


PROCESSAMENTO DIGITAL DO SINAL:

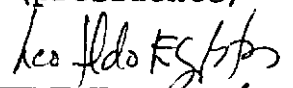
APLICAÇÕES EM ACÚSTICA E VIBRAÇÕES

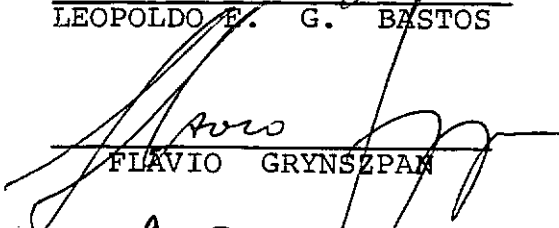
João Bosco Erthal Serrão

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVER
SIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU
DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M.Sc.).

Aprovada por:


JULES GHISLAIN SLAMA
(presidente)


LEOPOLDO E. G. BASTOS


FLAVIO GRYSZPAN


ARVIND CAPRIHAN

Rio de Janeiro
Estado do Rio de Janeiro - BRASIL
MARÇO DE 1977

A MEUS PAIS,
ANA LÚCIA

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Jules Slama pela sábia orientação desta tese.

Ao Professor Flávio Grynszpan pela ajuda e por ter posto à nossa disposição os meios do Laboratório do Programa de Engenharia Biomédica.

Ao pessoal do NCE pela acessoria nos programas de computador.

À Stra. Lilian Vicentini pela paciência em datilografar esta tese.

A todos amigos que me ajudaram e me estimularam na realização desta tese.

O AUTOR

SUMÁRIO

Com base nos estudos realizados por Goff^[7], sobre a transformada de Fourier rápida, [3] , [8] e dos conceitos sobre o cepstrum [2], elaborou-se vários estimadores das funções de correlação, espectro e cepstrum.

Determina-se a seguir uma cadeia completa de aquisição de dados.

Estudou-se a possibilidade de montagem de programas de computador em linguagem Fortran. Com estes programas foram analisados alguns casos de aplicação da teoria em problemas de acústica visando testar o processo.

RÉSUMÉ

A partir du travail de Goff^[7], ainsi que des études sur la transformée de Fourier rapide^[3], ^[8] et sur le cepstrum ^[2] ont été élaborés plusieurs estimateurs de fonctions de correlation, spectre, cepstrum.

Les elements d'une chaine d'aquisition de données ont été assemblés dans le but d'utiliser des programmes d'ordinateurs de traitement du signal en langage Fortran ont été vues particulièrement en acoustique et vibrations.

NOMENCLATURA

a, b	Constantes
$C_{XX}(T)$	Função de autocorrelação de X
$C_{XY}(T)$	Função de crosscorrelação entre X e Y
$E X $	Esperança matemática de X
f	Frequência (Hz)
$F X $	Transformada de Fourier de X
$h(f)$	Função de transferência (Hz)
$H(T)$	Resposta impulsiva do sistema (S)
$P X $	Probabilidade de X
q	Quefreny (S)
$Q_X(q)$	Função de Cepstrum de X
$QP_Z(a, b, q)$	Função de Cepstrum ponderado de Z
$S_{XX}(f)$	Função de autoespectro de X
$S_{XY}(f)$	Função de crossespectro entre X e Y
t	Tempo (S)
T	Atrazo (DELAY) (S)
$x^*(f)$	Complexo conjugado de $x(f)$
$X(t), Y(t), Z(t)$	Sinais processados
$W(T)$	Janela espectral

ÍNDICE

	pág.
CAPÍTULO I	
- INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II	
- PROCESSAMENTO DO SINAL EM VIBRAÇÕES	3
II.1. - PROCESSO ESTOCÁSTICO - TEORIA DA ESTIMAÇÃO	3
II.2. - ANÁLISE POR INTERMÉDIO DAS FUNÇÕES DE CORRELAÇÃO	8
II.3. - ANÁLISE ESPECTRAL	10
II.4. - ANÁLISE CEPSTRAL	11
CAPÍTULO III	
- ALGORÍTMOS PARA O PROCESSAMENTO DO SINAL	13
III.1. - TRANSFORMADA DE FOURIER RÁPIDA (FFT)	13
III.2. - FUNÇÕES DE AUTOCORRELAÇÃO E AUTOES- PECTRO	18
III.3. - FUNÇÕES DE CROSSCORRELAÇÃO (CORRELA- ÇÃO CRUZADA) E CROSSESPECTRO (ESPEC- TRO CRUZADO) SUBROTINA SCROS	31
III.4. - FUNÇÕES DE CEPSTRUM - PROGRAMA CEPST	37
III.5. - TRANSPARÊNCIA DE PAREDE - PROGRAMA TRANSP	44

III.6.- CONTRIBUIÇÃO ACÚSTICA E VIBRATÓRIA
- PROGRAMA COPEM

50

CAPÍTULO IV

- ESTUDO POR CEPSTRUM DE UM SISTEMA A ECO

55

CAPÍTULO V

- CONCLUSÕES E SUGESTÕES

67

BIBLIOGRAFIA

69

APÊNDICE 1

- DIGITALIZAÇÃO

I

APÊNDICE 2

- SUBROTINAS E PROGRAMAS

XXVIII

APÊNDICE 3

- ESTUDO DA CONTRIBUIÇÃO SONORA DE UMA FONTE
NO RUÍDO TOTAL DE UM DETERMINADO PONTO

LXXXVII

APÊNDICE 4

- TRANSPARÊNCIA DE PAREDE

CIII

APÊNDICE 5

- LANÇAMENTO DO NAVIO

CXIII

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Goff^[1] sugeriu algumas aplicações do processamento do sinal na resolução de problemas ligados à poluição acústica e vibratória.

Desde então alguns pesquisadores conseguiram resolver vários problemas de acústica e vibrações, utilizando as técnicas de processamento do sinal.

Surgiram no mercado alguns aparelhos cujo "Hardware" orienta-se para a solução dos mais diversos problemas, tendo por base o processamento do sinal. A cada dia que passa estes aparelhos tornam-se mais obsoletos, devido à descoberta de novos algoritmos de processamento.

A filosofia deste trabalho é elaborar para os computadores comuns, um "software" adequado às novas técnicas.

A vantagem operacional será decorrência da versatilidade de uso e economia de meios.

Para a aquisição dos dados necessita-se apenas de um bom gravador e transdutores.

As pesquisas referentes a este trabalho estão apresentadas em duas fases distintas. Numa primeira fase, pretende-se discutir o desenvolvimento de um "software fortran" para um sistema de processamento do sinal. Em seguida, aplicaremos as teorias desenvolvidas, no estudo de alguns casos particulares.

CAPÍTULO II

PROCESSAMENTO DO SINAL EM VIBRAÇÕES

II.1. - PROCESSO ESTOCÁSTICO - TEORIA DA ESTIMAÇÃO

Uma vibração aleatória é um sinal sobre o qual existe um certo grau de incerteza sobre o que ocorrerá. Na maioria dos casos, os valores futuros do sinal não podem ser previstos, mesmo depois de observarmos os valores passados. Logo, não é possível escrever uma expressão matemática explícita para o sinal.

Um exemplo de vibrações aleatórias seriam as vibrações introduzidas num automóvel em movimento devido às ondulações de uma pista de rolamento. O mesmo grau de incerteza é encontrado numa representação espectral de uma vibração aleatória. Por conseguinte, tem-se que considerar um resultado de acordo com as propriedades estatísticas do sinal aleatório.

Um processo estocástico pode ser considerado, do

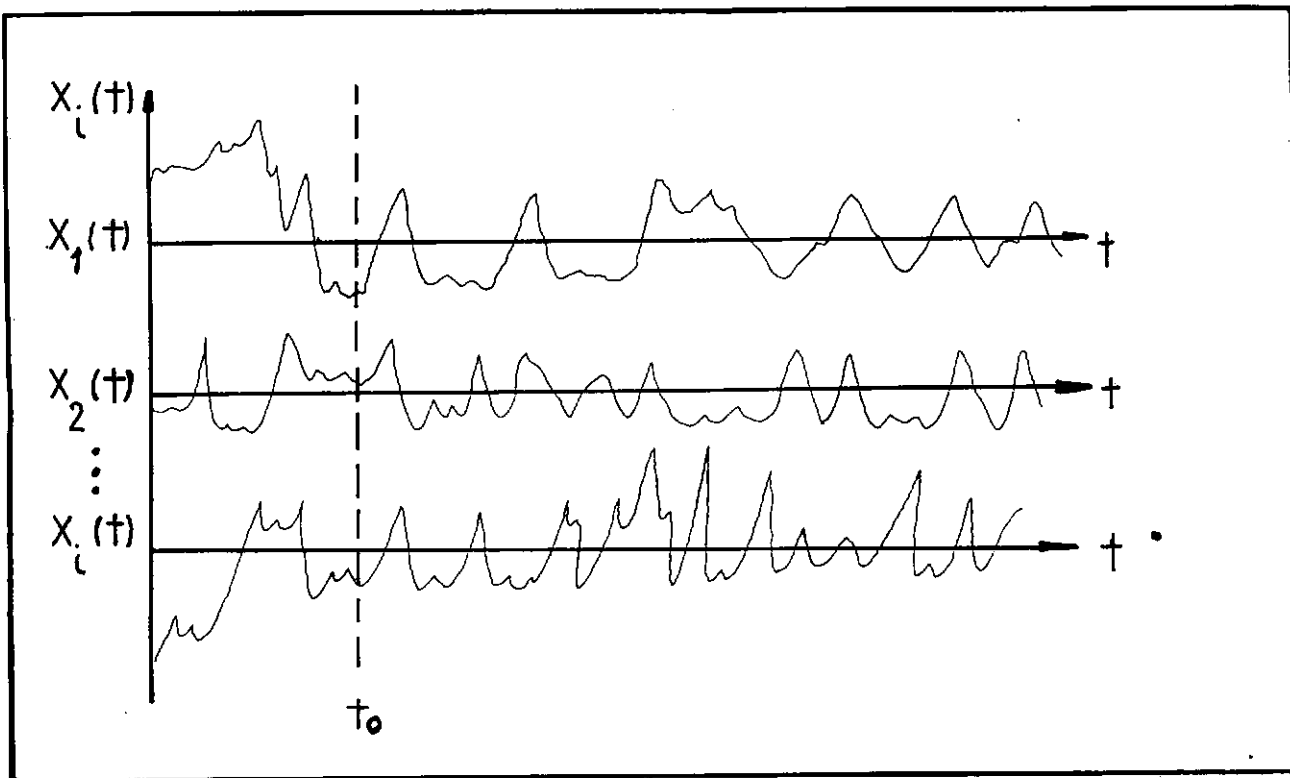
ponto de vista do experimentador, como um conjunto de funções numa urna.

Cada medição de um processo estocástico seria como a retirada de uma amostra desta urna.

O exemplar para o nosso caso será o $X_i(t)$. Assim, uma imagem interessante seria um conjunto de funções $X_1(t), X_2(t) \dots X_i(t)$. Vide figura 1.

Para um dado t_0 , as funções $X_1(t), X_2(t), \dots, X_i(t)$ transformam-se numa variável aleatória $X(t_0)$.

FIGURA I
EXEMPLO DE FUNÇÃO ALEATÓRIA



II.1.A. - VARIÁVEL ALEATÓRIA

Uma variável aleatória $X(t_0)$ é um número que depende da sorte. Ela é associada a uma densidade de probabilidade, isto é, a probabilidade de uma realização de $X(t)$ no intervalo $(x, x + dx)$

$$P_x (X \in [x, x + dx]) = f_x(x, w_1, w_2, \dots, w_n) dx$$

w_1, w_2, \dots, w_n são parâmetros da densidade de probabilidade.

A variável aleatória é definida por suas propriedades probabilísticas (densidade de probabilidade).

Podemos calcular a média estatística de uma função $G(X)$ da variável aleatória X .

Esta média é denominada a esperança matemática de $G(X)$ ou

$$E \{G(X)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} G(x) f_x(x) dx$$

Em geral pode-se obter experimentalmente algumas realizações da variável aleatória.

II.1.B. - ESTIMADORES

A teoria da estimação nos permite dar um valor aproximado dos parâmetros a partir das realizações da variável aleatória.

Seja W um parâmetro a estimar. Pode-se criar uma variável aleatória \hat{W} que segue alguns critérios, cuja realização fornece uma estimativa do parâmetro W .

II.1.C. - PROPRIEDADES DE UM ESTIMADOR

Temos duas propriedades a que regem os estimadores : a tendência e a variância.

A tendência (bias) de uma função é o valor esperado da mesma, subtraído do valor a estimar

$$B = E[\hat{W}] - W$$

A variância de uma função é por sua vez definida pela expressão:

$$\text{Var}[\hat{W}] = E[(\hat{W} - E\hat{W})^2]$$

O ideal seria que a variância e a tendência diminuíssem simultaneamente. Mas, em geral, são condições opostas, isto é, quando uma cresce a outra decresce.

A condição ótima ocorrerá quando o erro quadrático for mínimo, dado pela equação:

$$\text{Var } |\hat{W}| + B^2 = E \left| (\hat{W} - W)^2 \right| = \text{MÍNIMO}$$

Um estimador é dito consistente quando o número de medidas cresce indefinidamente acarretando com isto que a tendência e a variância sejam nulas.

II.1.1.D. - ESTIMAÇÃO POR INTERVALO DE CONFIANÇA

Sendo α um número compreendido entre zero e um, podemos dizer que:

$$P \left| -\ell_1 < \hat{W} - W < \ell_2 \right| = P \left| \hat{W} - \ell_2 < W < \hat{W} + \ell_1 \right| = 1 - \alpha$$

ou seja, a probabilidade de se encontrar W entre $(\hat{W} - \ell_2, \hat{W} + \ell_1)$ é igual a $\left| (1 - \alpha) \times 100 \right| \%$.

Denominamos $(\hat{W} - \ell_2, \hat{W} + \ell_1)$ ao intervalo de confiança sendo \hat{W} obtido dos parâmetros x_1, x_2, \dots, x_i .

$\left| (1 - \alpha) \times 100 \right| \%$ é definido como o coeficiente de segurança.

Podemos associar uma distribuição a cada variável aleatória e, de posse desta distribuição dado o valor de α , po

demos calcular ℓ_1 e ℓ_2 .

As distribuições mais usadas são: a normal, a chi-quadrada e a student t.

Em geral, usamos a normal, quando conhecemos a média e a variância. Caso não tenhamos nenhuma das duas utilizamos a student t para calcular a média, e a chi-quadrada para calcular a variância.

II.2. - ANÁLISE POR INTERMÉDIO DAS FUNÇÕES DE CORRELAÇÃO

II.2.1. - AUTOCORRELAÇÃO

Seja $X(t)$ uma função aleatória estacionária ergódica, a autocorrelação $C_{xx}(T)$ é definida por:

$$C_{xx}(T) = E \{X(t) X(t-T)\}$$

ela pode ser estimada por:

$$\hat{C}_{xx}(T) = \frac{1}{D} \int_0^D X(t) X(t-T) dt$$

onde D será o tempo de integração e T é um retardo aplicado à função $X(t)$.

Para este estimador temos que a tendência (bias) é igual a zero e a variância é diferente de zero.

Tem-se duas propriedades importantes a saber:

A - A função de autocorrelação é par:

$$C_{xx}(T) = C_{xx}(-T)$$

Em consequência, só é necessário medir a função nos seus valores (positivos ou negativos) de T. A função é simétrica. A transformada de Fourier só apresentará termos em cosseno.

$$F \left| C_{xx}(T) \right| = 2 \int_0^{\infty} C_{xx}(T) \cos(2 \pi f T) dT$$

B - A função de auto correlação é máxima quando $T = 0$. Se $T \neq 0$ então:

$$\left| C_{xx}(T) \right| < C_{xx}(0)$$

II.2.2. CROSSCORRELAÇÃO (CORRELAÇÃO CRUZADA)

Sejam $X(t)$ e $Y(t)$ duas funções temporais. Definimos como função de crosscorrelação (correlação cruzada) de $X(t)$ em $Y(t)$ por:

$$C_{xy}(T) = E \{ X(t) Y(t-T) \}$$

esta função é estimada por:

$$C_{xy}(T) = \frac{1}{D} \int_0^D X(t) Y(t-T) dt$$

onde D é o tempo de integração e T um retardo aplicado à função Y(t).

As propriedades desta função são:

$$a) \quad C_{xy}(T) = C_{yx}(-T)$$

$$b) \quad C_{xy}(\infty) = C_{yx}(\infty) = 0$$

$$c) \quad \left| C_{xy}(T) \right| \leq \frac{1}{2} \left| C_{xx}(0) + C_{yy}(0) \right|$$

d) Se X(t) e Y(t) são independentes entre si então:

$$C_{xy}(T) = 0$$

II.3. - ANÁLISE ESPECTRAL

II.3.1. - AUTOESPECTRO

A função de Autoespectro $S_{xx}(f)$ é definida por:

$$S_{xx}(f) = F \left| C_{xx}(T) \right|$$

Sendo F a transformada de Fourier, $S_{xx}(f)$ representa fisicamente uma decomposição em frequência da potência transformada pelo sinal.

II.3.2. - CROSSESPECTRO (ESPECTRO CRUZADO)

A função de Crossespectro (espectro cruzado) $S_{xy}(f)$ é definida por:

$$S_{xy}(f) = F \left| C_{xy}(T) \right|$$

A função de crossespectro (espectro cruzado) é um número complexo da forma:

$$S_{xy}(f) = R_{xy}(f) - i J_{xy}(f)$$

onde:

$$R_{xy}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} C_{xy}(T) \cos 2 \pi f T \, dT$$

$$J_{xy}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} C_{xy}(T) \sin 2 \pi f T \, dT$$

II.4. - ANÁLISE CEPSTRAL

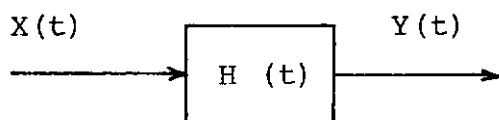
II.4.1. - CEPSTRUM

O Cepstrum $Q_x(q)$ é definido por:

$$Q_x(q) = \left| F \left\{ \log \left| S_{xx}(f) \right| \right\} \right|^2$$

II.4.2. - CEPSTRUM PONDERADO

Sejam as funções $X(t)$ e $Y(t)$ tais que sejam definidas pelo modelo:



definimos $Z(t)$ como:

$$Z(t) = (a X(t) + b Y(t))$$

O cepstrum ponderado será:

$$Q_P(a,b,q) = \left| F \left\{ \log |S_{ZZ}(f)| \right\} \right|^2$$

temos a relação

$$Q_P(a,b,q) = Q_{(ax+by)}(q)$$

CAPÍTULO III

ALGORÍTMOS PARA O PROCESSAMENTO DO SINAL

III.1.- TRANSFORMADA DE FOURIER RÁPIDA (FFT)

III.1.1 - TEORIA

A execução numérica de uma transformada de Fourier direta é dada por:

$$Y_r = \frac{1}{N} \sum_{r=0}^{N-1} X_r e^{-j2\pi qF/N} \quad \text{ou}$$

$$Y_r = \frac{1}{N} \sum_{r=0}^{N-1} X_r W^{qf} \quad (1)$$

em que N é o número de pontos.

Essencialmente envolve:

a) O cálculo de todos os valores relevantes de w^{qf} , que poderá ser pré-computado e armazenado.

b- O cálculo e a soma de todos os produtos $X_r w^{qf}$ para:

$$q = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad \text{e} \quad f = 0, 1, 2, \dots, N-1$$

A operação B é a que requer a maior parte do tempo de computação, caso não possa ser pré-computada. Torna-se dispendiosa em termos de tempo de computação, o dos produtos dos valores de X_f pelas correspondentes potências de w .

Então, com o intuito de minimizar o número de multiplicações em B, surgiu a FFT.

Num procedimento simples de B, temos: $4 N^2$ multiplicações reais para valores complexos de X_f e $2N^2$ multiplicações reais para valores reais da mesma função.

A FFT minimiza o número de multiplicações, pela eliminação da periodicidade das potências de W e pela seleção de certos grupamentos de produtos a serem calculados. Isto garante que nenhuma multiplicação será realizada mais de uma vez.

Se assumirmos que N é composto pelo menos de 2 fatores inteiros n e m tais que ambos sejam maiores que 1,

$$m, n > 1, \text{ inteiros} \tag{2}$$

$$N = m \cdot n$$

Podemos agora mostrar o princípio da FFT de maneira objetiva.

Substituiremos os índices q e f de (1) por dois índices de acordo com:

$$f = f_1 m + f_0 \begin{cases} f_1 = 0, 1, 2, \dots, n-1 \\ f_0 = 0, 1, 2, \dots, m-1 \end{cases} \quad (3)$$

$$q = q_1 n + q_0 \begin{cases} q_1 = 0, 1, 2, \dots, m-1 \\ q_0 = 0, 1, 2, \dots, n-1 \end{cases} \quad (4)$$

Substituindo o produto (qf) pelas relações acima, temos:

$$qf = (f_1 m + f_0) (\mu_1 n + \mu_0)$$

$$qf = f_1 q_1 N + f_1 q_0 m + f_0 q_1 n + f_0 q_0 \quad (5)$$

A periodicidade da w^{fq} poderá ser eliminada:

$$w^{fq} = e^{-j2\pi fq/N}$$

$$w^{fq} = \underbrace{e^{-j2\pi f_1 q_1}}_1 \cdot e^{j2\pi f_1 q_0/n} \cdot e^{-j2\pi f_1 q_0/n} \cdot e^{-j2\pi f_0 q_1/m} \cdot e^{-j2\pi f_0 q_0/N} \quad (6)$$

A transformada de Fourier poderá agora ser executada de acordo com:

$$Y_f = Y_{q_1 n + q_0}$$

$$Y_f = \frac{1}{N} \sum_{q=0}^{m-1} e^{-j2\pi q f_0 / N} \sum_{f_1=0}^{n-1} X_{f_1 m + f_0} e^{-j2\pi q_0 f_1 / n} \quad (7)$$

onde o primeiro somatório:

$$X(q_0, f_0) = \sum_{f_1=0}^{n-1} X_{f_1 m + f_0} e^{-j2\pi q_0 f_1 / n}$$

é computado para todas as combinações possíveis de f_0 e q_0 , que implica, essencialmente em (Nm) multiplicações. Deverá ser feito um total de $|N(m+n)|$ produtos, ao invés de N^2 , no procedimento comum.

Por conseguinte, cada vez será menor o número de operações, se aumentarmos o número de fatores, isto é, se em lugar de apenas dois, usarmos 3, 4, 5 fatores e assim por diante.

A solução ótima se obtém quando fazemos N igual a uma potência de 2:

$$N = 2^m \text{ sendo que } m \text{ é inteiro}$$

este é o caso mais favorável da FFT.

Quando o número de pontos não satisfaz a esta con

dição, completamos com zeros até satisfazê-la.

Existem vários programas de FFT com as mais diversas sofisticações.

III.2 - FUNÇÕES DE AUTOCORRELAÇÃO E AUTOESPECTRO

III.2.1 - FLUXOGRAMA GERAL

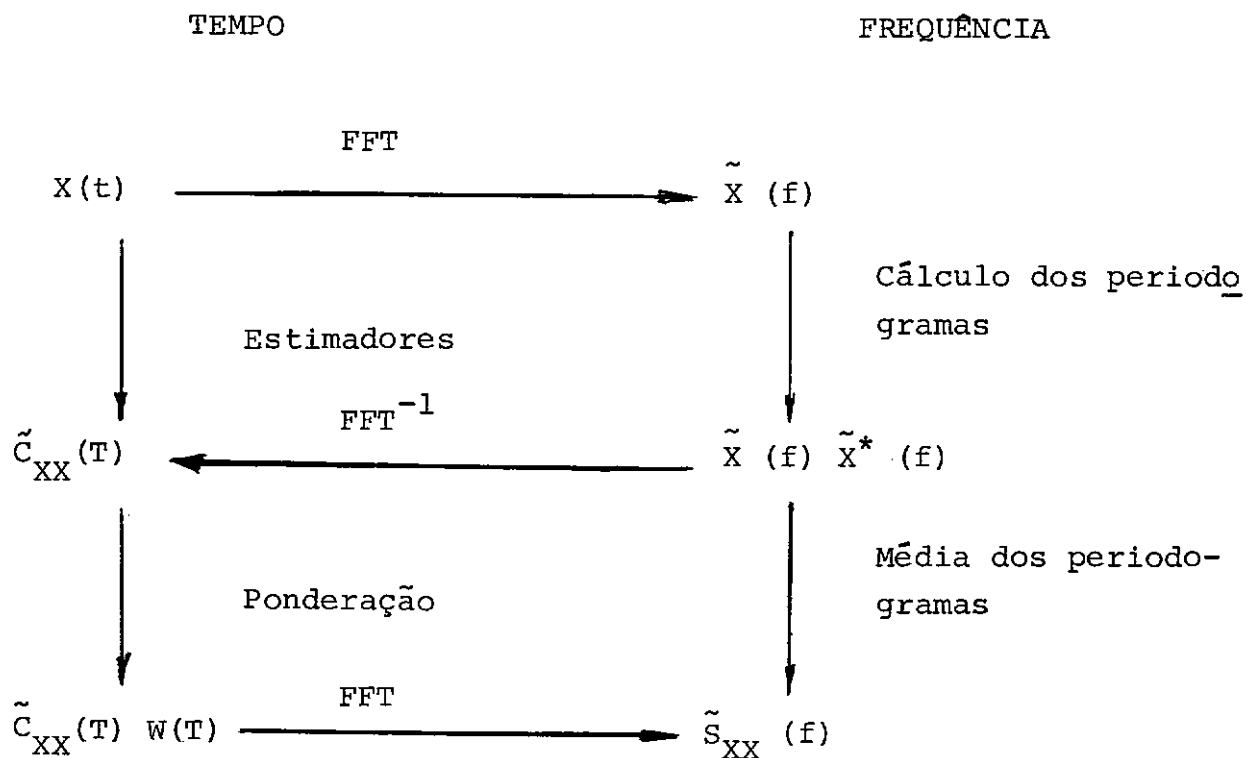


FIGURA 2

FLUXOGRAMA PARA O CÁLCULO DAS
FUNÇÕES DE AUTOCORRELAÇÃO E AUTOESPECTRO

III.2.1 - CÁLCULO POR PONDERAÇÃO - SUBROTINA SAUT

III.2.1 - FINALIDADE E USO

A subrotina SAUT tem por finalidade o cálculo das funções de autocorrelação, autoespectro e logarítmo do autoespectro.

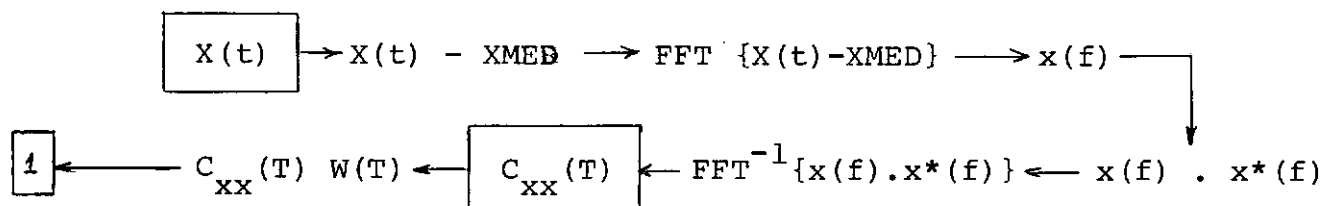
Seus argumentos são: B, N, M, X, DEP e DIP.

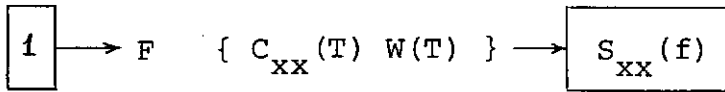
B(I) é uma função discreta. N é um número igual ou maior que o dobro do número de pontos de B(I). Devido à utilização da FFT, N obedece à seguinte relação:

$$N = 2^M$$

X(I) representa a função de autocorrelação, DIP(I) a função de autoespectro e DEP(I) o logarítmo da função de autoespectro.

III.2.1.2- ESQUEMA DO CÁLCULO DAS FUNÇÕES DE AUTOCORRELAÇÃO E AUTOESPECTRO PELO MÉTODO DE PONDERAÇÃO DA AUTOCORRELAÇÃO

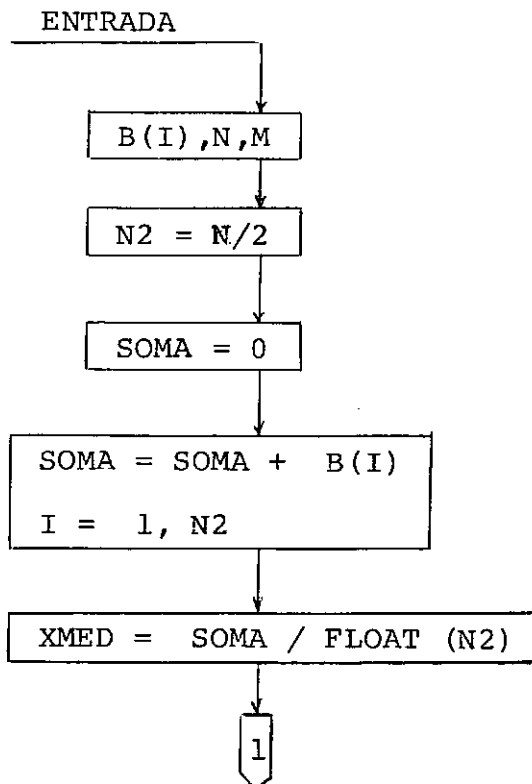


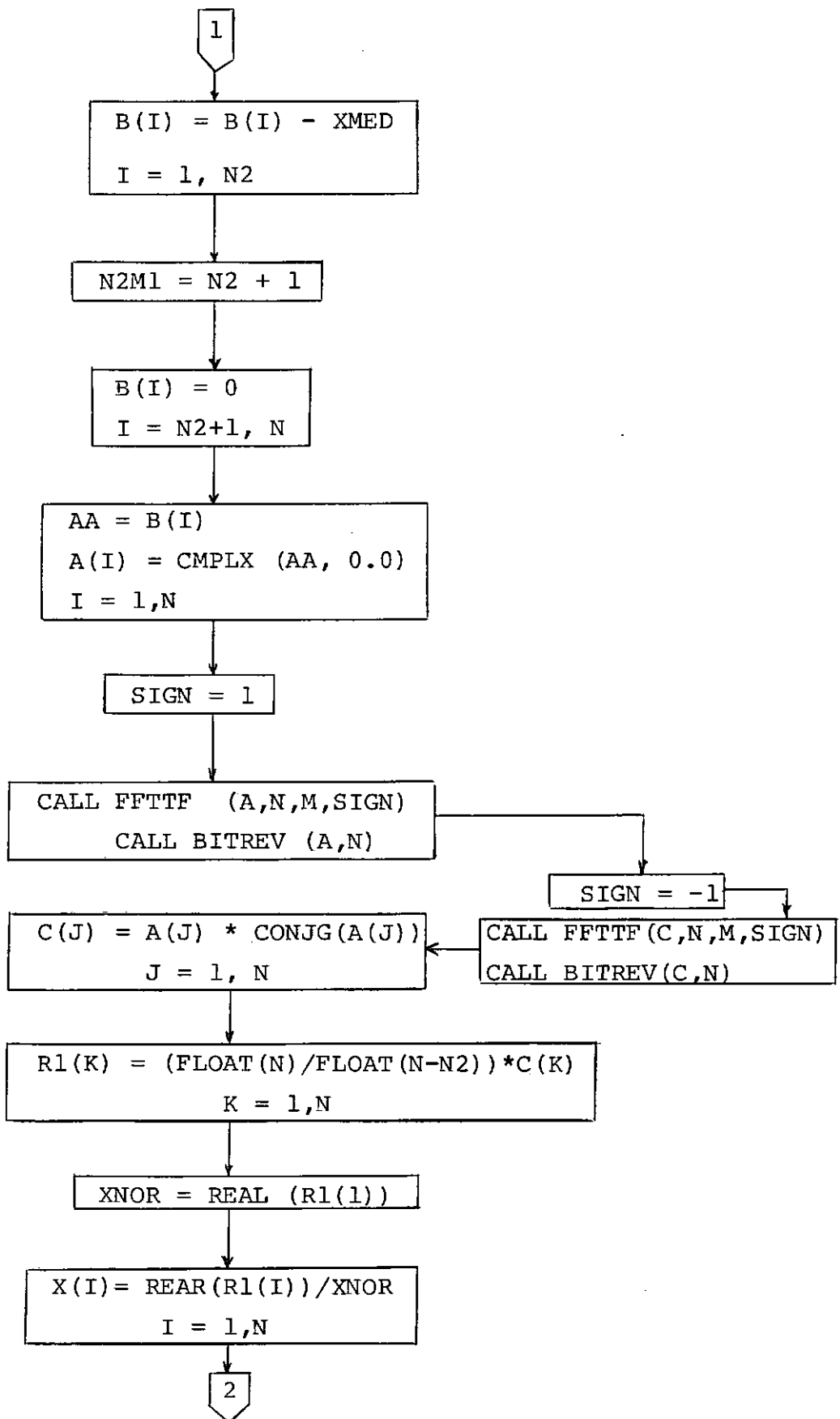


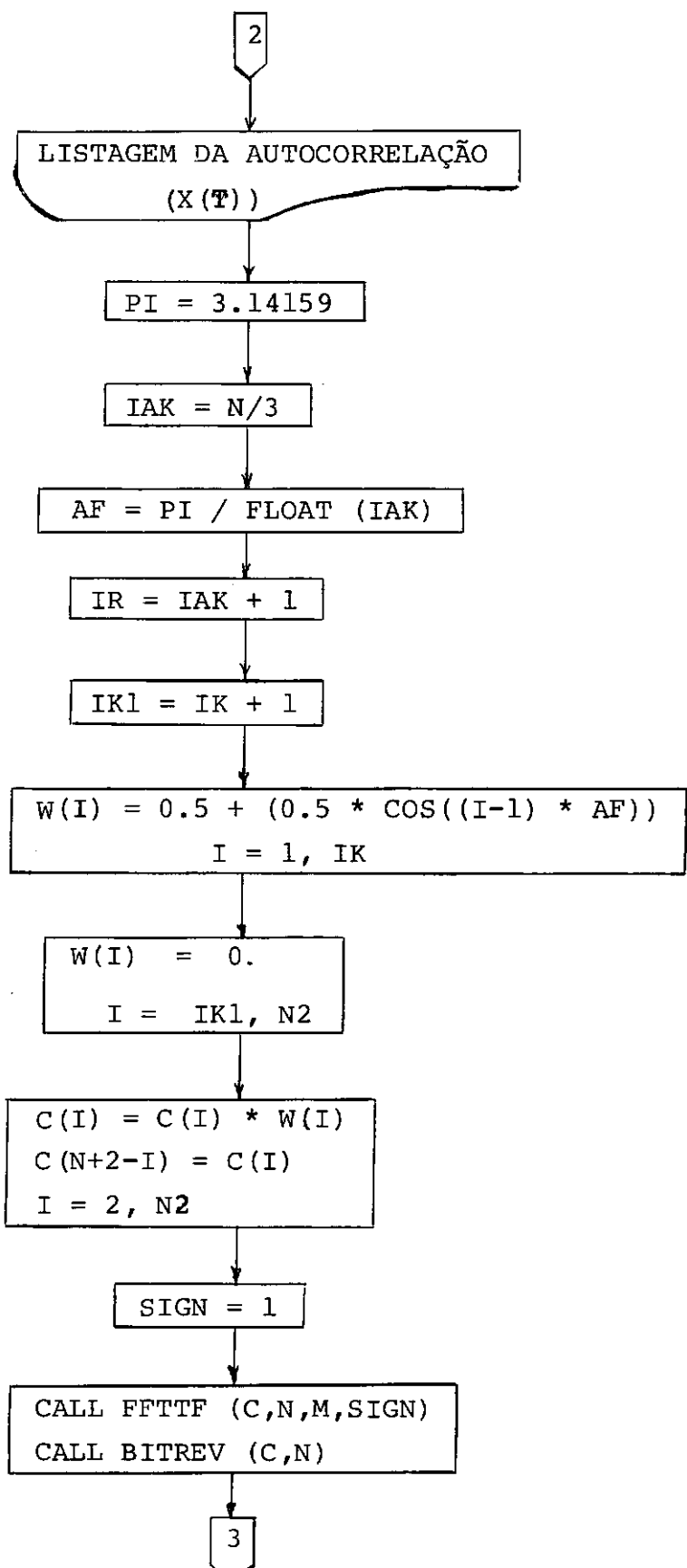
A operação $|X(t) - XMED|$ é uma centralização da função $X(t)$, o objetivo disto é a eliminação do sinal constante, sinal este que se não for retirado dara um pico na frequência nula que dificultará a interpretação das altas frequências.

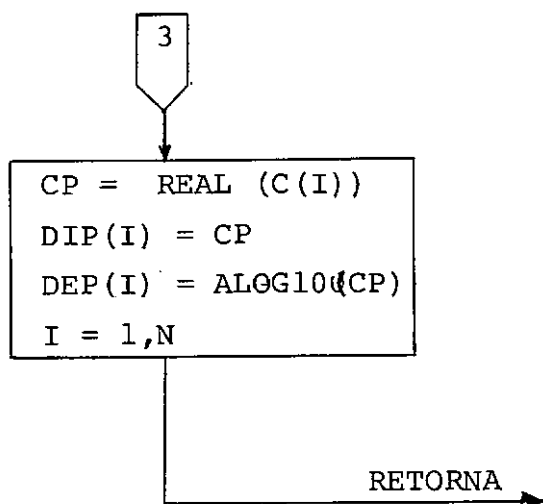
$W(T)$ representa uma janela espectral com a qual ponderamos a função de correlação para que quando calcularmos a função de densidade espectral seja esta de interpretação mais fácil.

DIAGRAMA DE BLOCO DA SUBROTINA SAUT









III.2.2 - CÁLCULO PELA MÉDIA DOS PERIODOGRAMAS - SUBROTINA AEMED

III.2.2.1 - FINALIDADE E USO

Este programa tem por finalidade o cálculo do au toespectro, utilizando o método das médias para melhorar o estimador do autoespectro.

Este método é realizado do seguinte modo:

- A- Divide-se o sinal em diversas faixas
- B- Calcula-se o autoespectro de cada faixa
- C- Calcula-se a média dos estimadores do autoespectro

Esta última fase (C) torna o estimador do autoespectro muito mais preciso.

Para usarmos o programa, devemos conhecer os seguintes parâmetros:

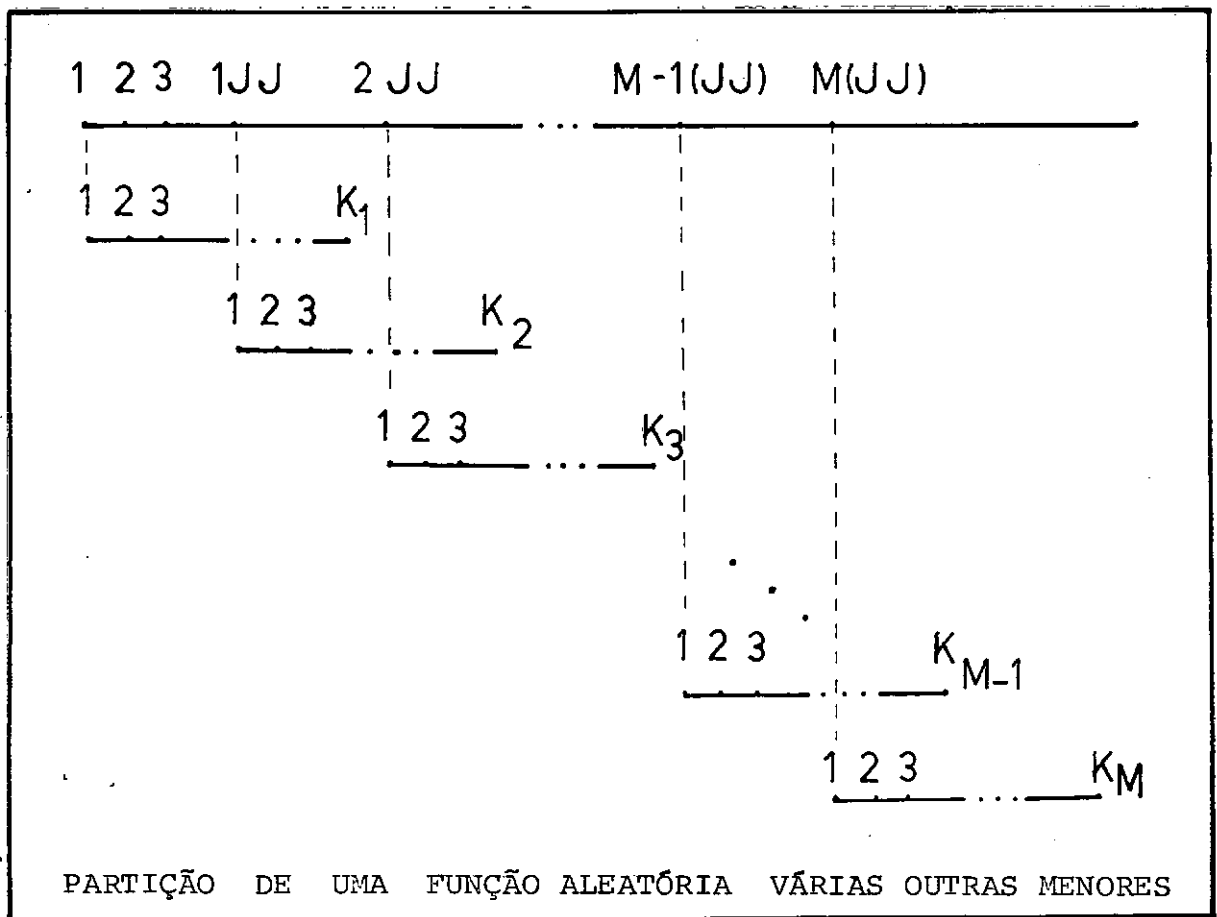
- 1- N que representa o número global de dados
- 2- M o número de faixas do sinal, mas este deverá ser menor ou igual a 20
- 3- IK representa o número de dados por faixa, não devendo ser maior que 1024
- 4- JJ representa o início da nova faixa
- 5- IE deve ser tal que: $IK = 2^{IE}$
- 6- NL indica o tipo de leitura que devemos fazer. Como já sabe-

mos, a digitalização poderá dar-nos dois tipos de cartões perfurados. O primeiro, quando temos 2 funções e seus pontos são representados alternadamente no cartão. Como no cartão são perfurados 16 dados, os ímpares são da 1.^a função e os pares da 2.^a, usamos $NL = 1$ para a 1.^a e $NL=2$ para a 2.^a função.

Porém há casos em que, no cartão, existe apenas uma função e este é perfurado no formato (16I5). Neste caso, usamos $NL = 3$.

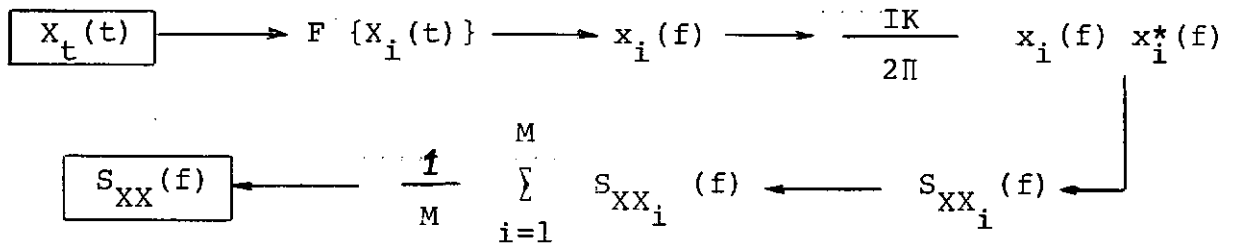
Para melhor compreensão destes parâmetros, anexamos a figura abaixo:

FIGURA 3

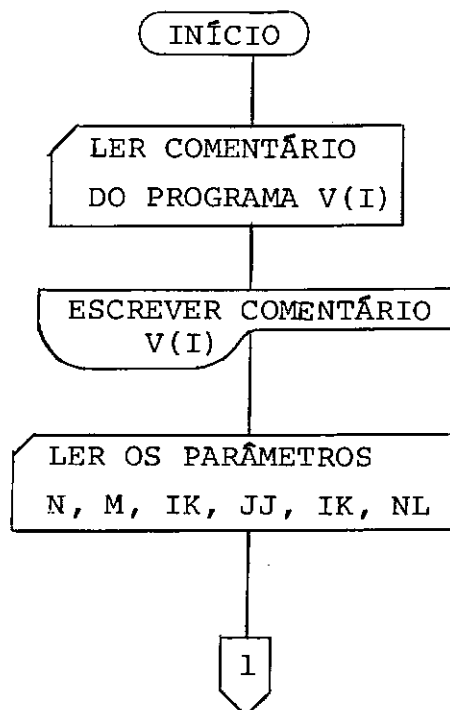


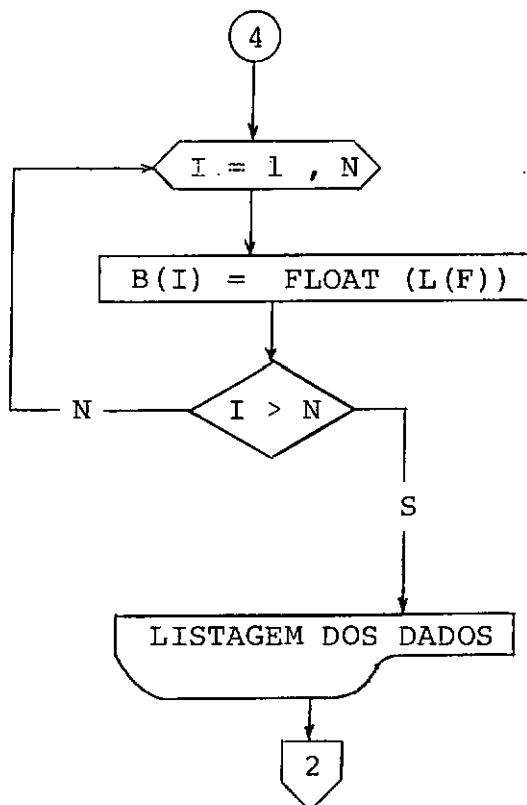
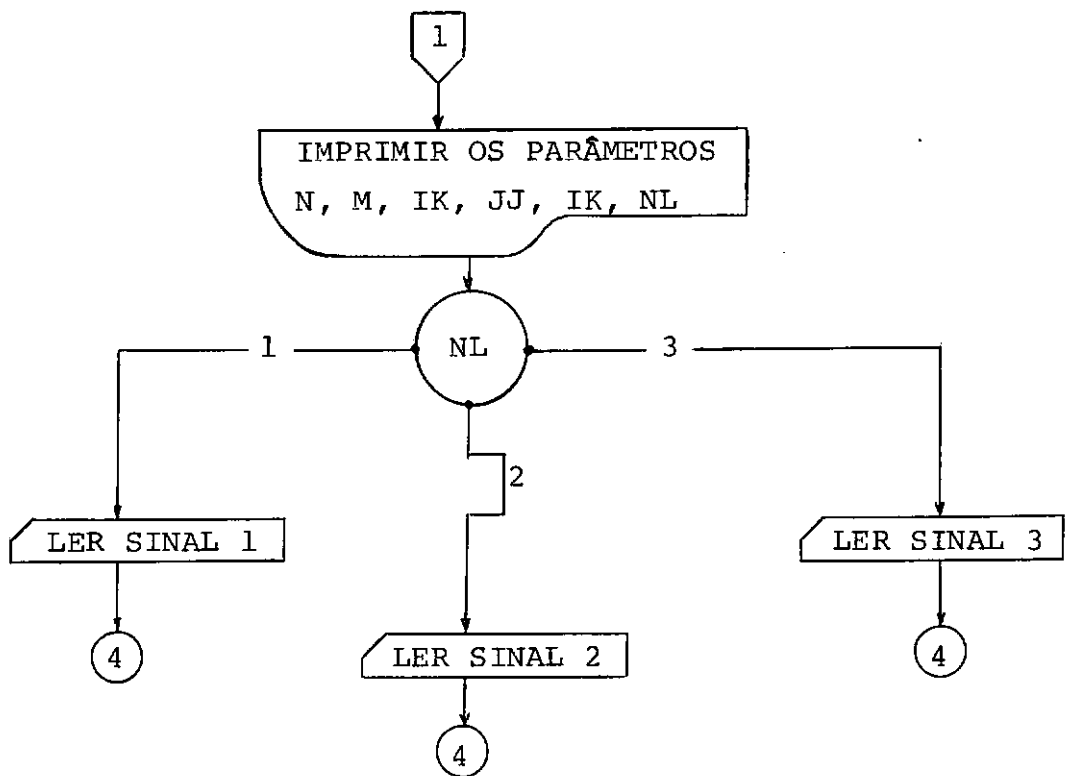
III.2.2.2 -ESQUEMA PARA O CÁLCULO DO AUTOESPECTRO UTILIZANDO AS MÉDIAS

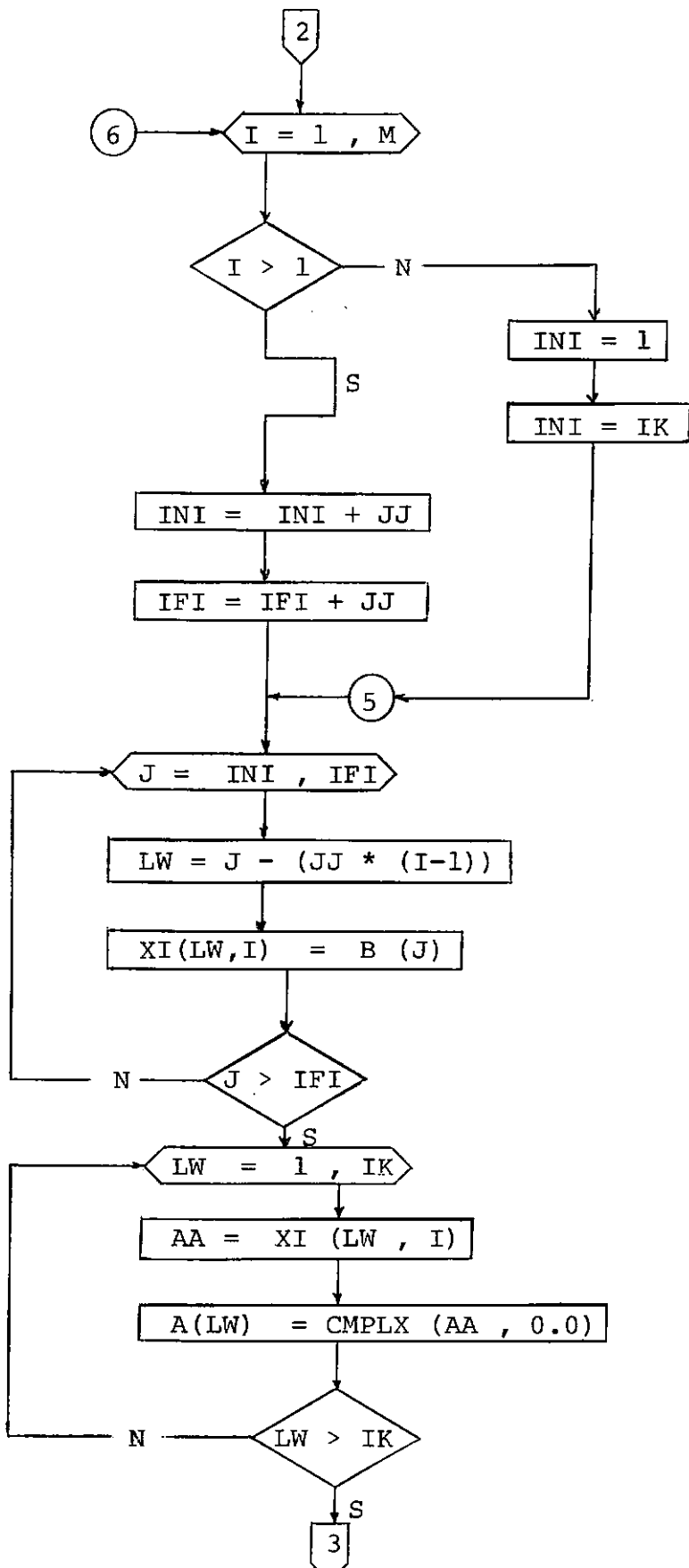
$$t = 1, 2, 3, \dots, IK \quad ; \quad i = 1, 2, 3, \dots, M$$

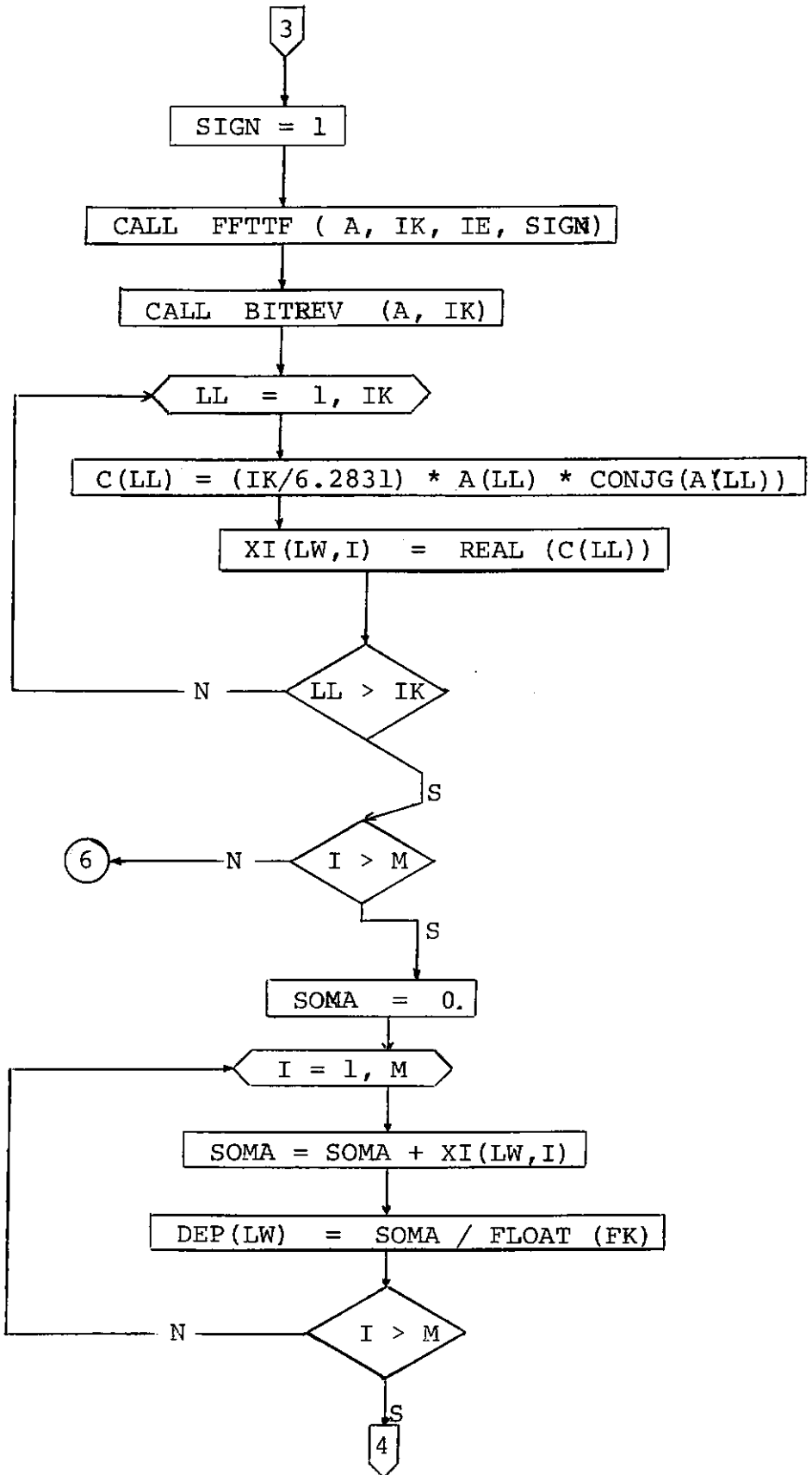


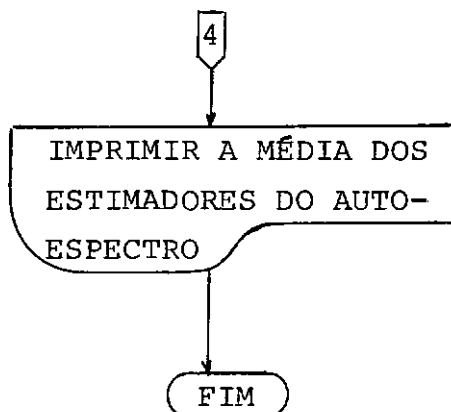
III.2.2.3 - DIAGRAMA DE BLOCO DO PROGRAMA AEMED











III.3. - FUNÇÕES DE CROSSCORRELAÇÃO (CORRELAÇÃO CRUZADA) E CROSS-ESPECTRO (ESPECTRO CRUZADO) SUBROTINA SCROS

III.3.1. - FINALIDADE E USO

A finalidade desta subrotina é o cálculo das funções de crosscorrelação e crossespectro.

Os argumentos da subrotina SCROS são: X, Y, N, M
XN, XM.

X e Y são as funções das quais queremos calcular a crosscorrelação e o crossespectro.

N o número de pontos destas funções e M é tal que

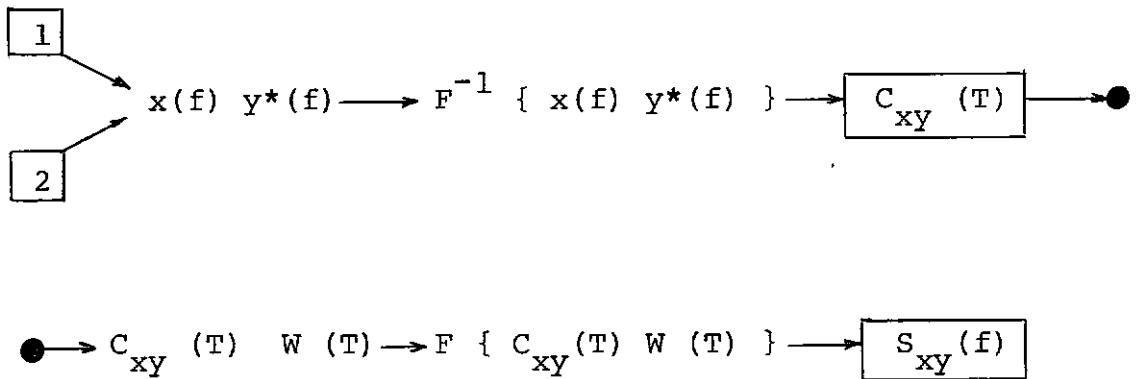
$$N = 2^M$$

XN representa a função de crosscorrelação assim como XM a de crossespectro.

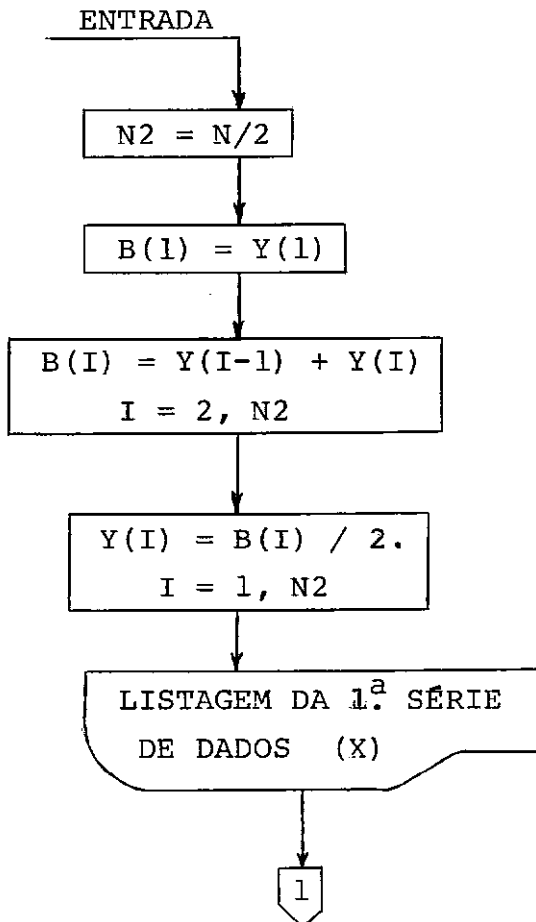
III.3.2.- ESQUEMA DO CÁLCULO DAS FUNÇÕES DE CROSSCORRELAÇÃO E CROSSESPECTRO

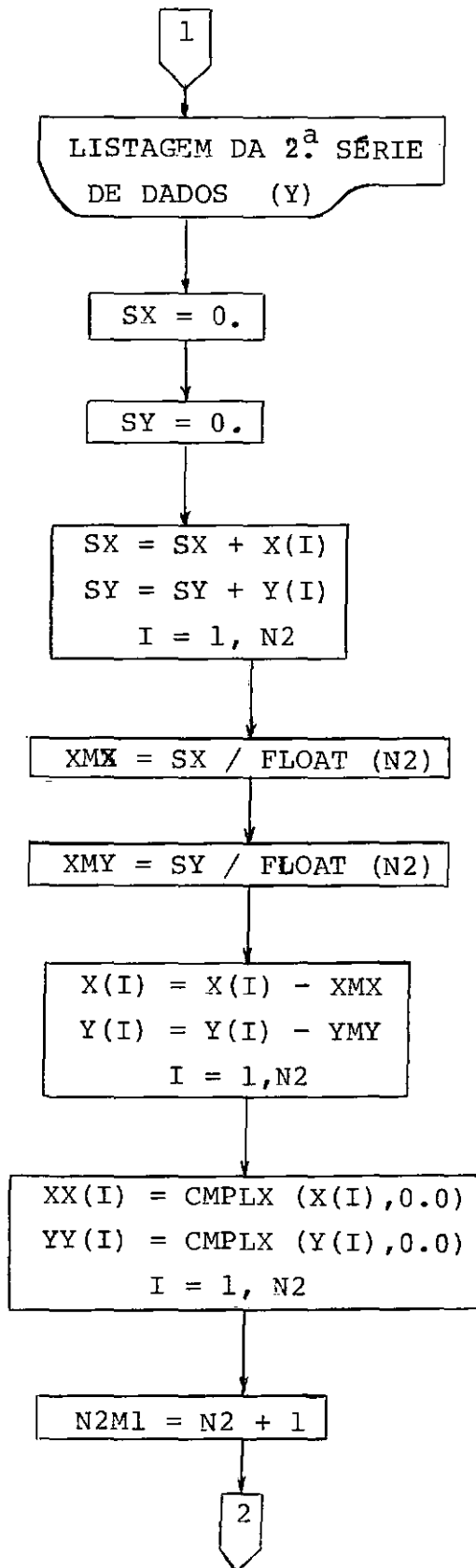
$$\boxed{X(t)} \rightarrow X(t) - X_{MED} \rightarrow F \{ X(t) - X_{MED} \} \rightarrow x(f) \longrightarrow \boxed{1}$$

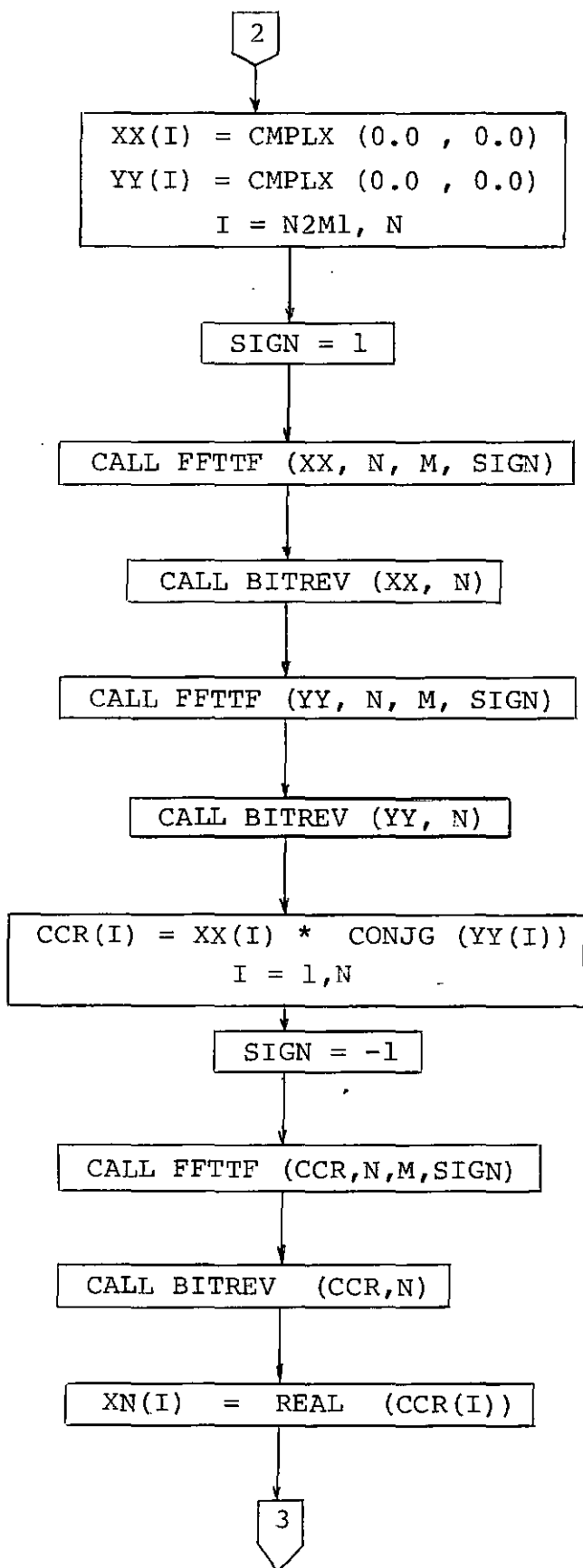
$$\boxed{Y(t)} \rightarrow Y(t) - Y_{MED} \rightarrow F \{ Y(t) - Y_{MED} \} \rightarrow y(f) \longrightarrow \boxed{2}$$

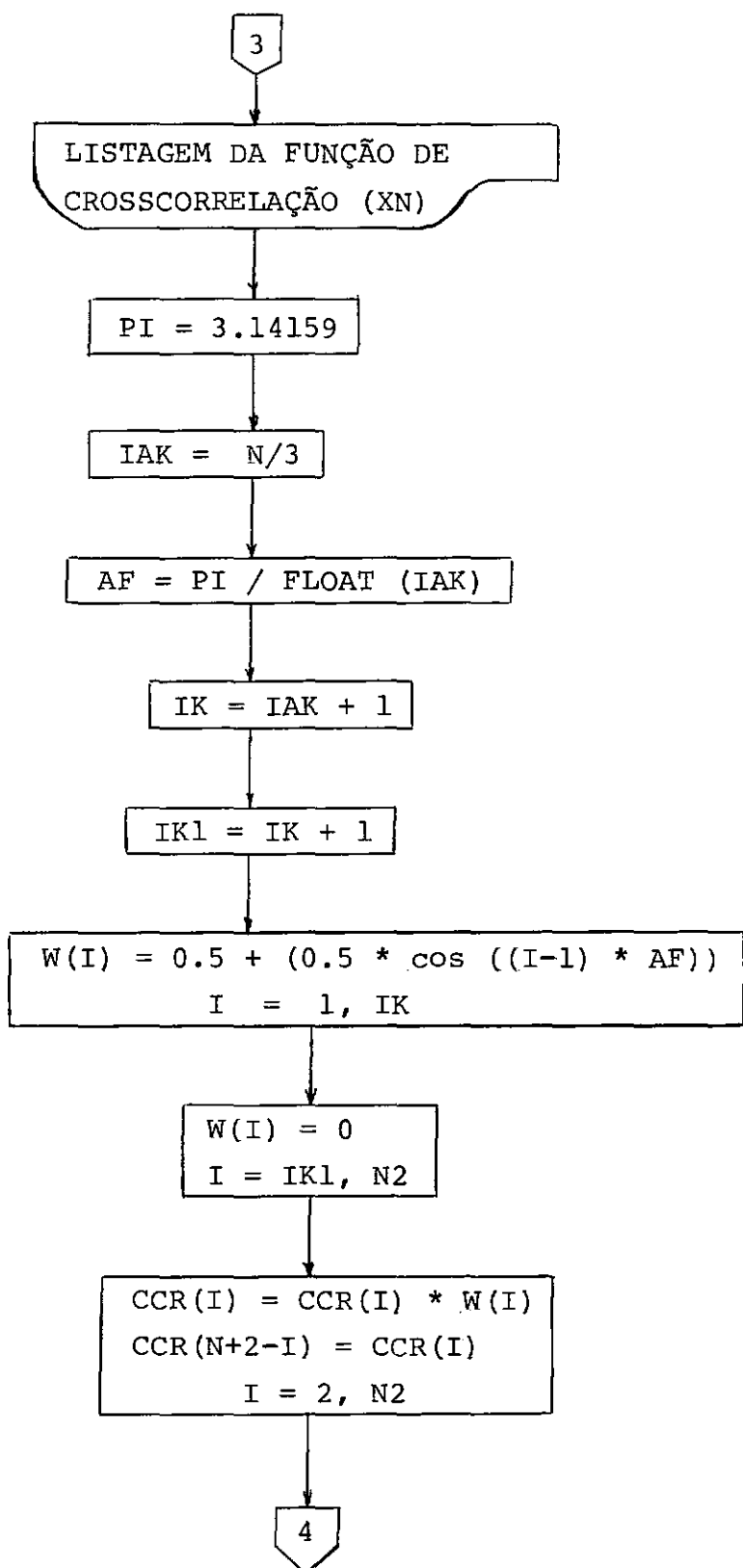


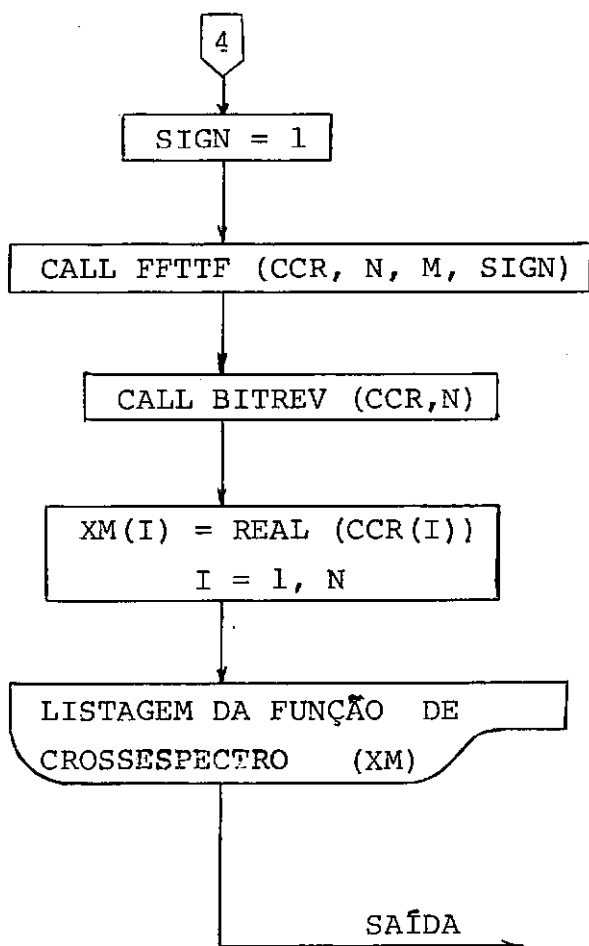
III.3.3. -DIAGRAMA DE BLOCO DA SUBROTINA SCROS











III.4. - FUNÇÕES DE CEPSTRUM - PROGRAMA CEPST

III.4.1. - FINALIDADE E USO

O programa CEPST calcula as funções de: autocorrelação, autoespectro, cepstrum simples e cepstrum ponderado.

Os parâmetros utilizados neste programa são: N, M, N3, IFAT1, IFAT2.

N é o número de pontos com os quais vamos calcular a função. M é um número que obedece à seguinte relação:

$$N = 2^M$$

N3 é o número de dados obtidos na digitalização. Este parâmetro, em geral, é igual a (N/2), porém há casos em que, devido a N ser muito grande, N3 é inferior a (N/2). Quando isto ocorrer, a função L(I) que tem apenas N3 dados, estes em número inferior a N/2, será completada com zeros até N/2. Em todos os casos dobraremos a função com zeros, isto é, do ponto (N/2)+1 até N.

IFAT1 representa o parâmetro com que vamos multiplicar a primeira função e IFAT2 o parâmetro com que multiplicamos a segunda.

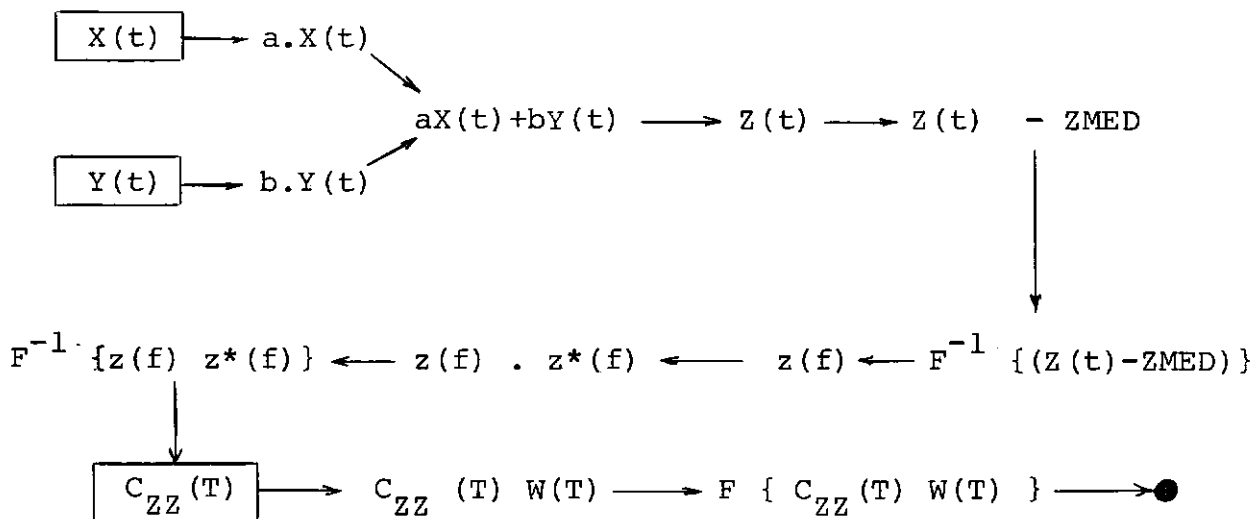
Quando quisermos a análise simples, faremos um destes parâmetros igual a 1 (é o sinal que vamos analisar) e o outro igual a zero. Para a análise ponderada, utilizamos IFAT1 e IFAT2 para efetivarmos esta ponderação.

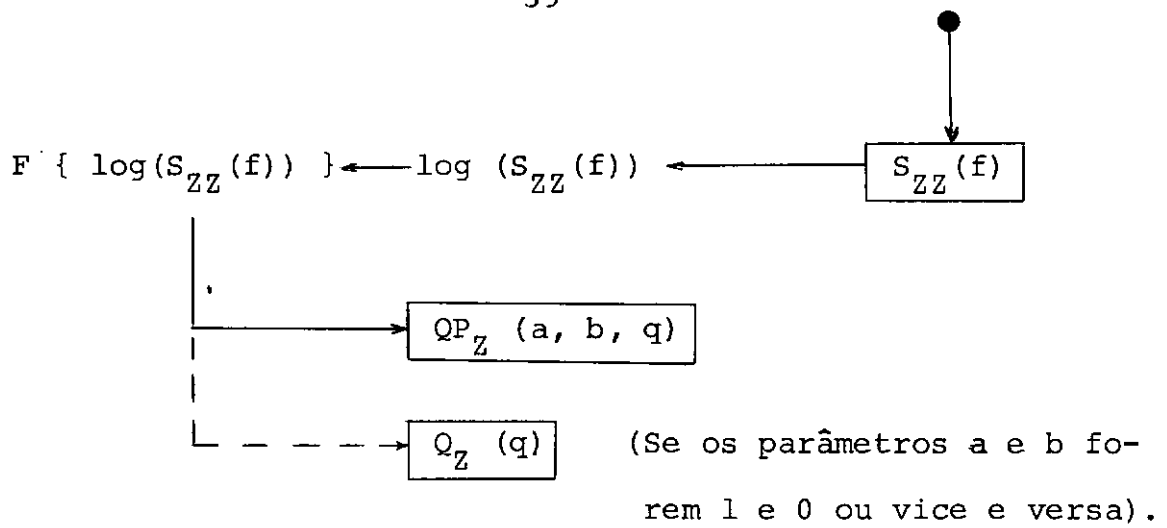
O programa filtra o Cepstrum após o cálculo do mesmo.

A saída compreende as seguintes funções: a função que vamos analisar, a autocorrelação desta função, o autoespectro, o logarítmo do autoespectro e o cepstrum. Para uma melhor representação desta última função zeramos os IZR primeiros pontos, sendo que:

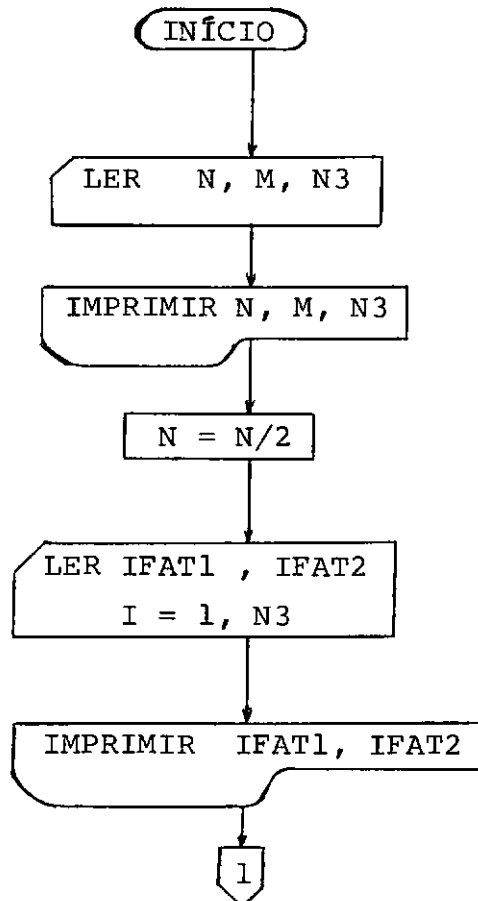
$$IZR = N/80$$

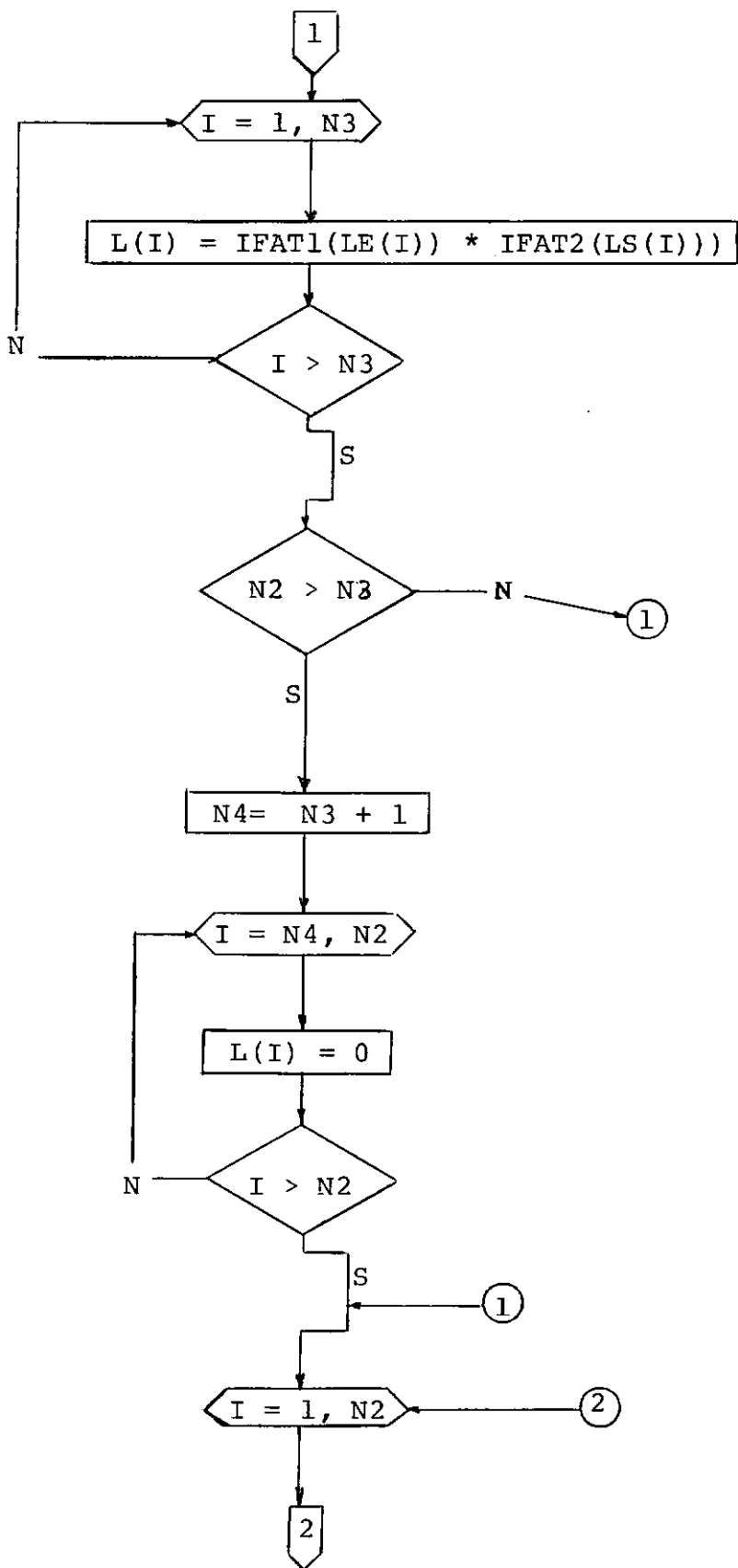
III.4. - ESQUEMA DE CÁLCULO DO CEPSTRUM

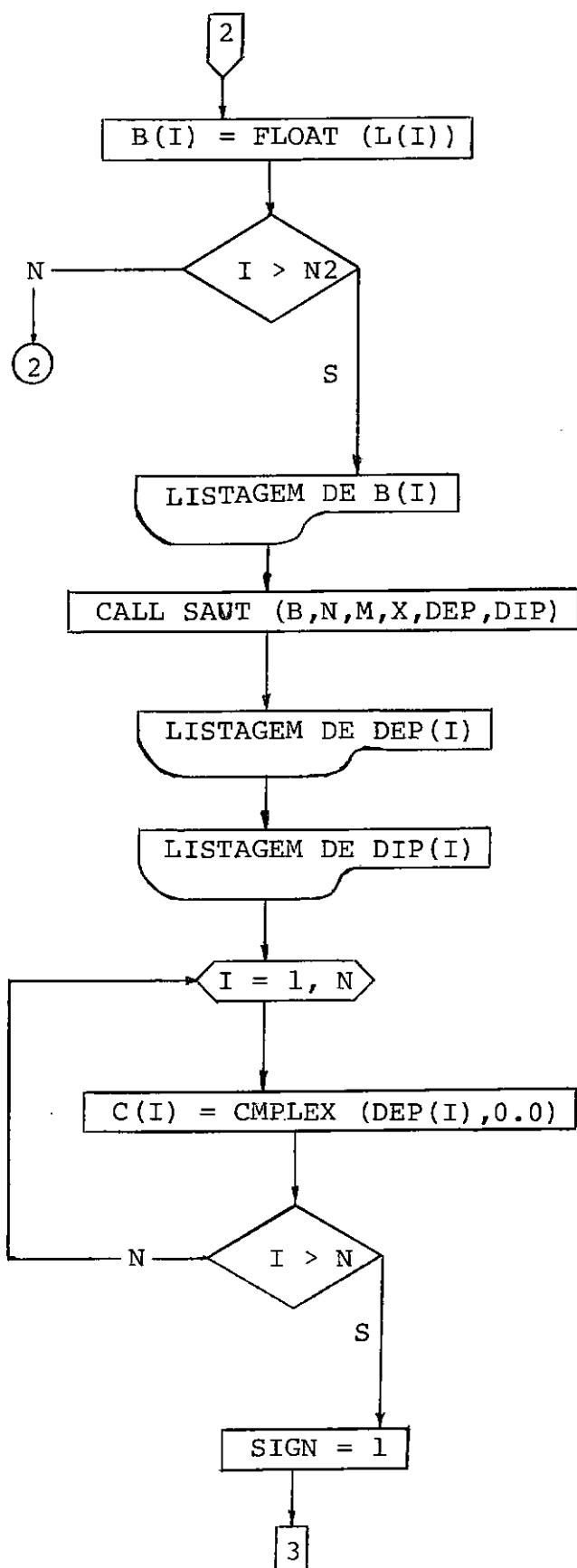


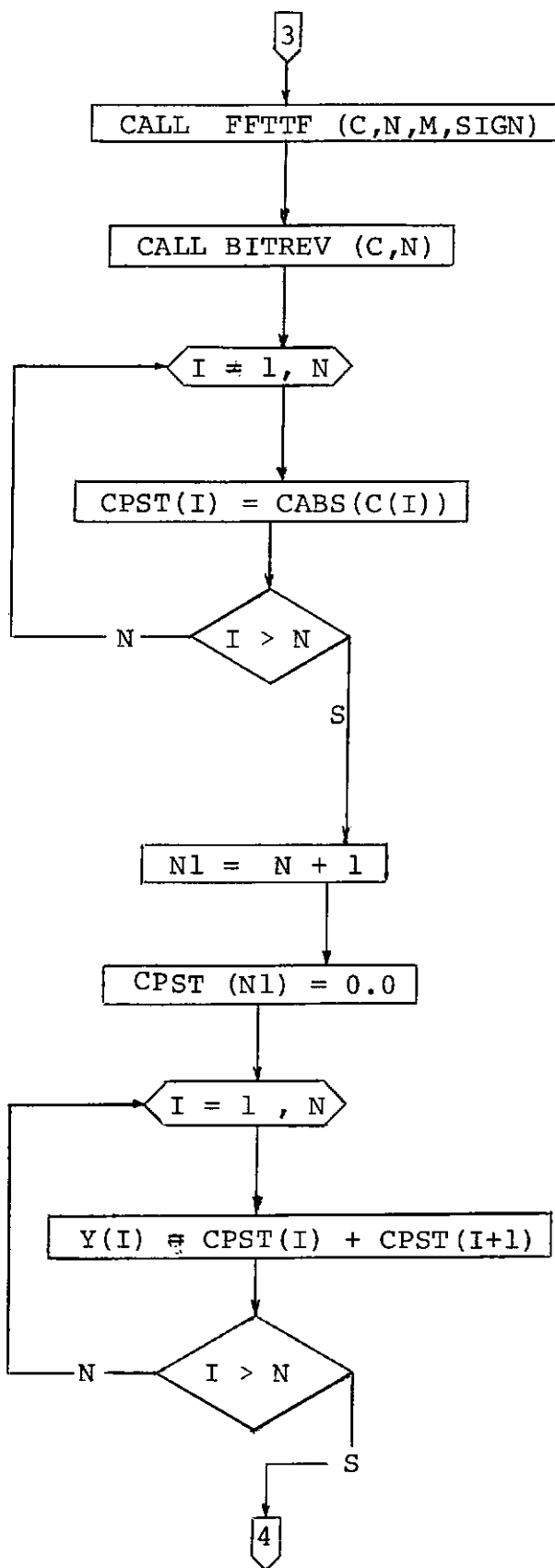


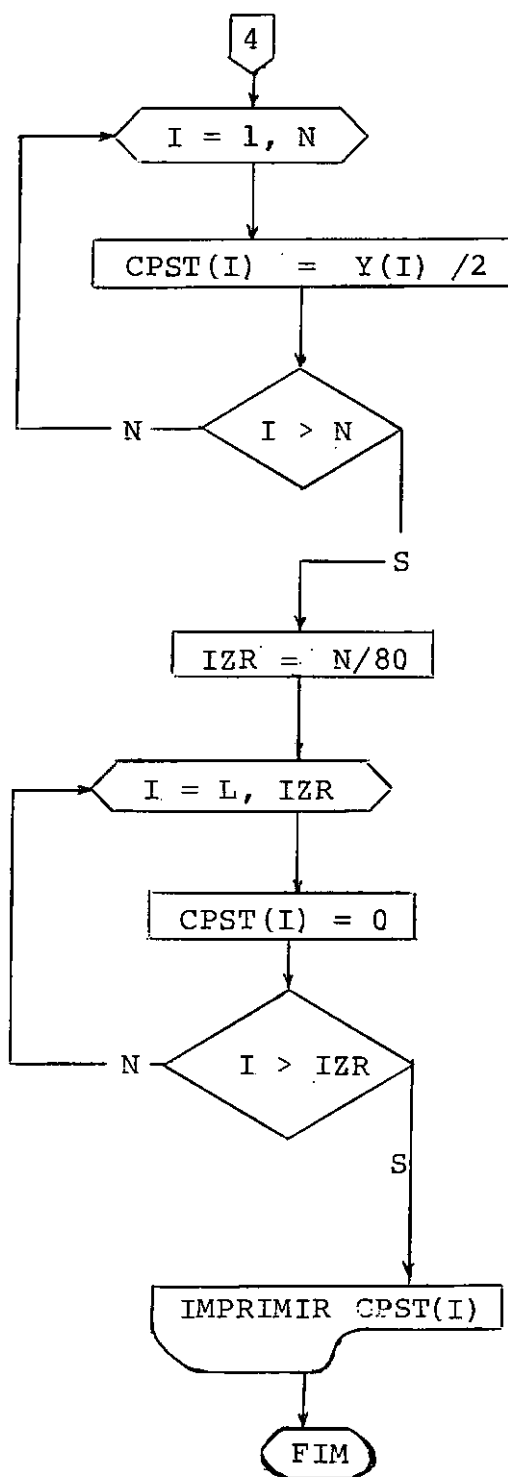
III.4.2.- DIAGRAMA DE BLOCO DO PROGRAMA CEPST











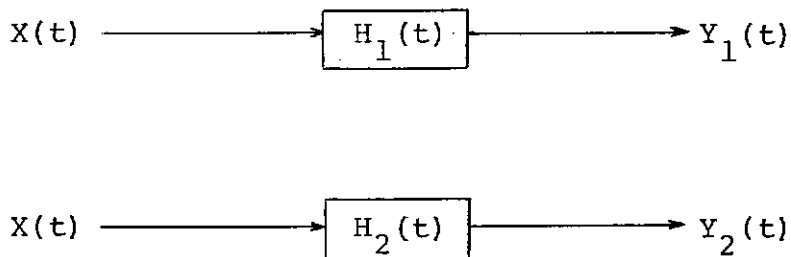
III.5. - TRANSPARÊNCIA DE PAREDE - PROGRAMA TRANSP

III.5.1 - TEORIA

A finalidade do programa TRANSP é calcular a função de transferência de uma parede.

Para o cálculo desta função utilizamos um sinal do tipo RUÍDO BRANCO, que será transmitido à parede por um alto-falante e recebido do outro lado da parede por um microfone.

Em seguida, repetimos o mesmo processo sem a parede. A figura abaixo revela-nos como são feitas estas medidas



$X(t)$ é um sinal de tipo RUÍDO BRANCO.

$H_1(t)$ é a função de transferência do meio com a parede e $Y_1(t)$, a função recebida pelo microfone nesta fase da

experiência. $H_2(t)$ é a função de transferência do meio sem parede e $Y_2(t)$ a função recebida pelo microfone nesta 2.^a fase.

Destas duas experiências podemos armar 2 equações, a saber:

$$S_{Y_1 Y_1}(f) = \left| h_1(f) \right|^2 S_{XX}(f) \quad (1)$$

$$S_{Y_2 Y_2}(f) = \left| h_2(f) \right|^2 S_{XX}(f) \quad (2)$$

$$h(f) = F \{ H(t) \}$$

Função de Transferência

Como a experiência é feita no mesmo local, então:

$$h_1(f) = h_2(f) \cdot h_p(f)$$

onde $H_p(t)$ é a função de transferência da parede.

Igualando as equações (1) e (2) temos:

$$\frac{S_{Y_1 Y_1}(f)}{S_{Y_2 Y_2}(f)} = \frac{\left| h_1(f) \right|^2}{\left| h_2(f) \right|^2} = \left| h_p(f) \right|^2$$

onde

$$\left| h_p(f) \right|^2 = S_{Y_1 Y_1}(f) / S_{Y_2 Y_2}(f)$$

III.5.2. - USO DO PROGRAMA

Para utilizarmos o programa, primeiro devemos possuir duas séries de dados, correspondentes às funções recebidas pelos microfones, sendo que a primeira e a última sem parede.

O primeiro cartão nos serve para identificar a experiência processada. Após este, devemos colocar um cartão que nos dê os parâmetros N, M e N3.

N é o número de pontos com os quais calculamos a função de transferência.

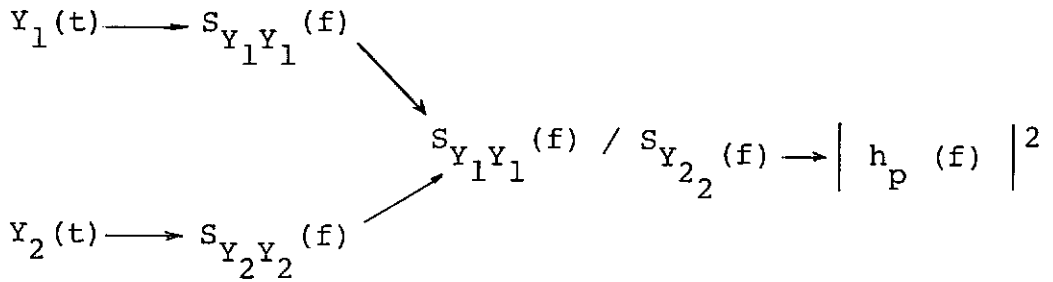
M é tal que:

$$N = 2^M$$

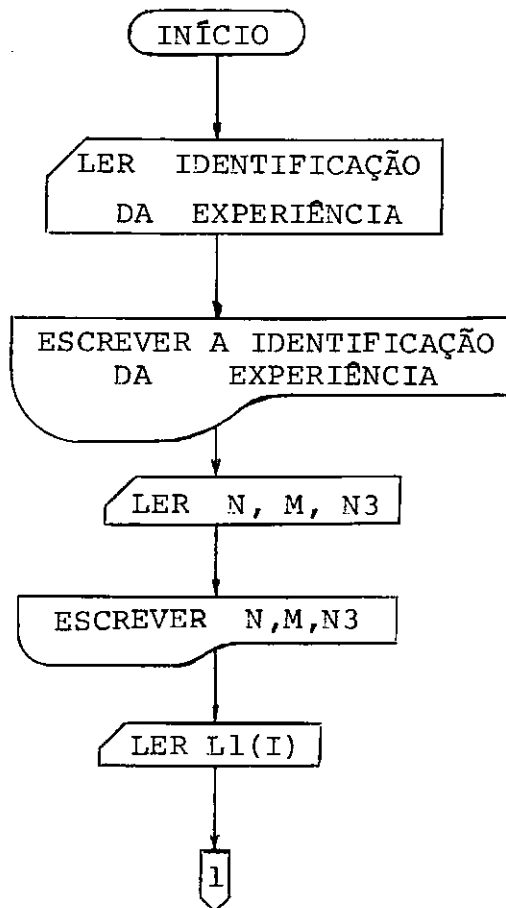
N3 é o número de dados que o computador lerá por função. O valor de N3 é, no máximo, igual a N/2.

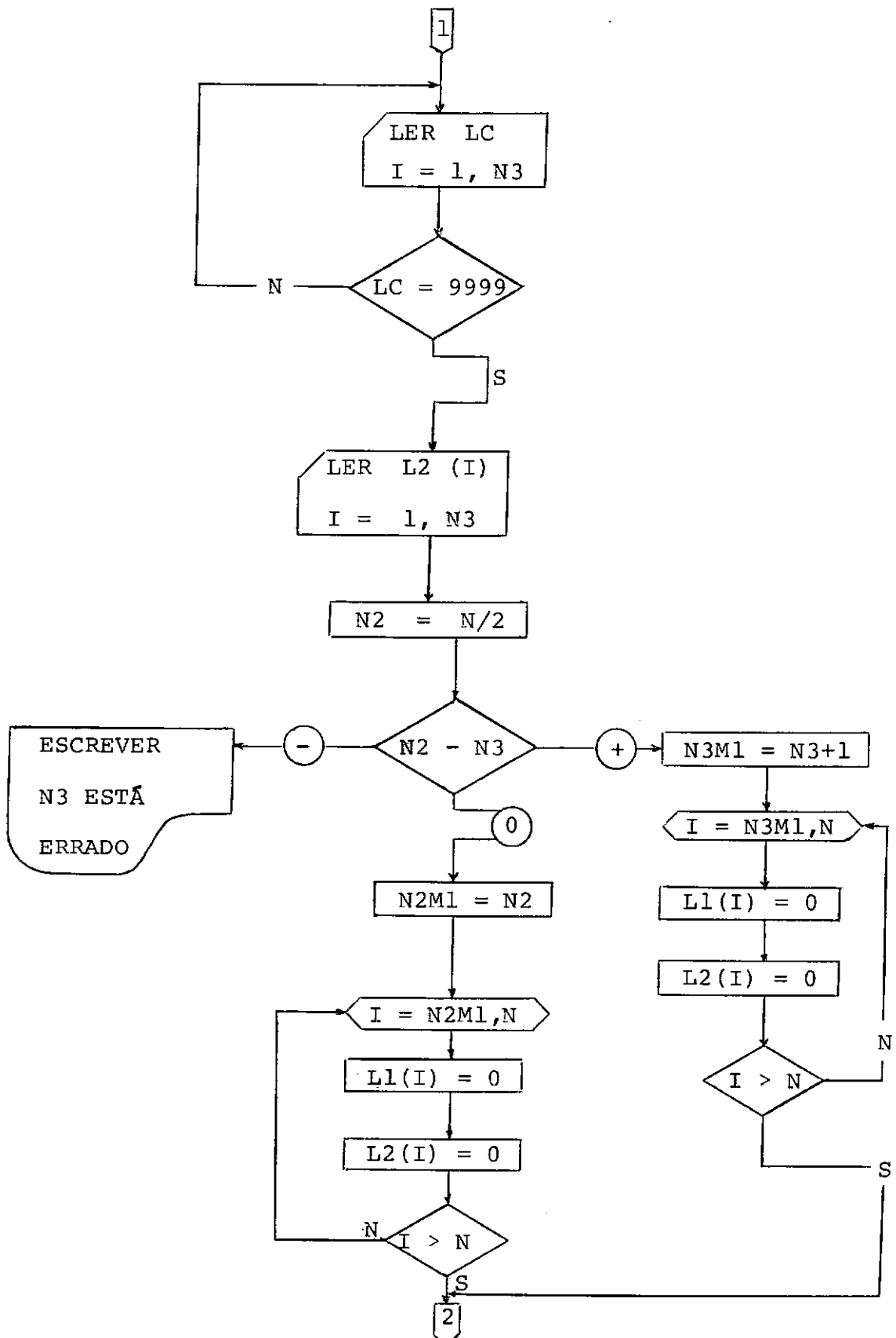
Seguindo este cartão, colocamos a 1.^a série de dados. Antes da 2.^a série, é necessário colocar um cartão perfurado com o formato I5 e com o valor 9999. Este cartão identifica o início da 2.^a série.

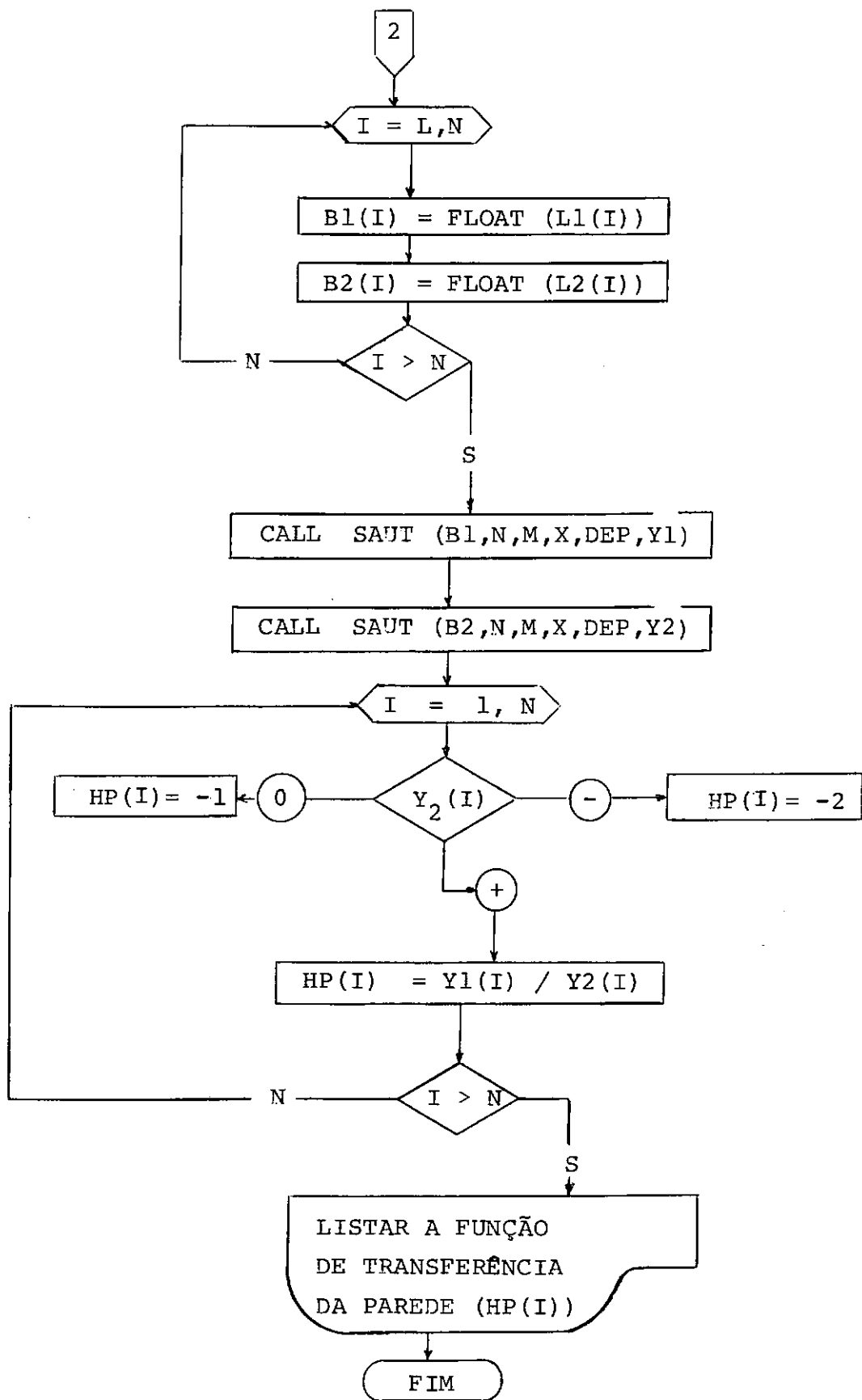
III.5.3.- ESQUEMA PARA O CÁLCULO DA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA



III.5.4.- DIAGRAMA DE BLOCO DO PROGRAMA TRANSP







III.5. - CONTRIBUIÇÃO ACÚSTICA E VIBRATÓRIA - PROGRAMA COPEM

III.6 .1.- FINALIDADE E USO

A finalidade deste programa é o cálculo da influência de uma fonte no ruído total.

Para efetuarmos esta análise necessitamos basicamente de dois sinais:

- O primeiro indicará o local onde desejamos calcular a influência de uma fonte;
- O segundo o sinal da própria fonte em questão.

Como em geral, utilizamos 2 transdutores diferentes, é necessário que o sinal de cada transdutor transmita o ruído do mesmo ponto.

Então temos, na realidade, 4 sinais que entram no computador da seguinte forma:

- A - sinal do transdutor nº 1 que ficará perto da fonte, o qual é captado junto ao transdutor nº 2.
- B- Sinal do transdutor nº 2 captado junto ao transdutor nº 1 e ao mesmo tempo que ele.
- C- Sinal do transdutor nº 1 junto à fonte, da qual queremos medir a contribuição no ruído ambiente total.
- D- Sinal do transdutor nº 2 no local exato onde queremos medir a

contribuição. Este sinal é captado ao mesmo tempo que o sinal C.

Devemos entrar com os parâmetros N, M e F.

N é o número de pontos com os quais calculamos a contribuição. M é tal que:

$$N = 2^M$$

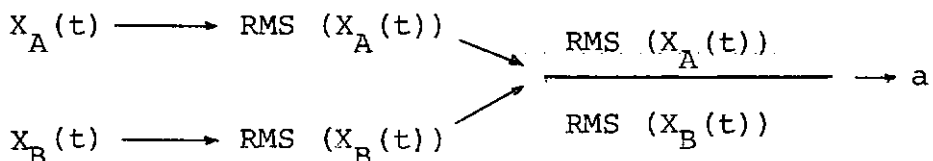
F é a frequência máxima com a qual digitalizamos os sinais captados pelos transdutores em Hertz.

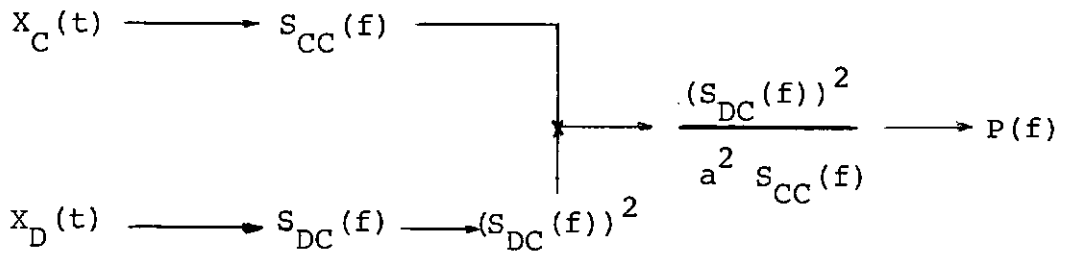
Os transdutores podem ser tanto microfones como acelerômetros.

Os dados devem obedecer à seguinte sequência:

- a- cartão que identifica a experiência;
- b- cartão contendo os parâmetros: N, M, F
- c- cartões com os sinais A e B
- d- cartões com os sinais C e D

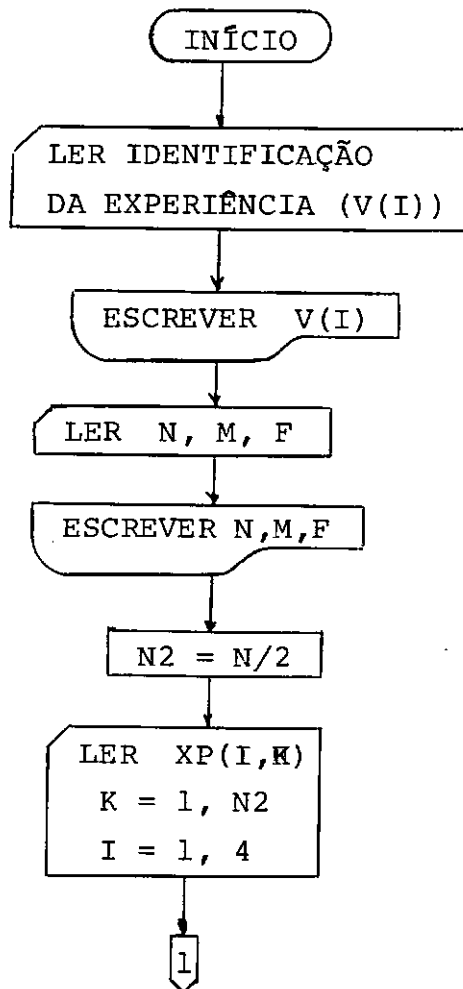
III.6.2. - ESQUEMA PARA O CÁLCULO DA CONTRIBUIÇÃO SONORA DE UMA FONTE

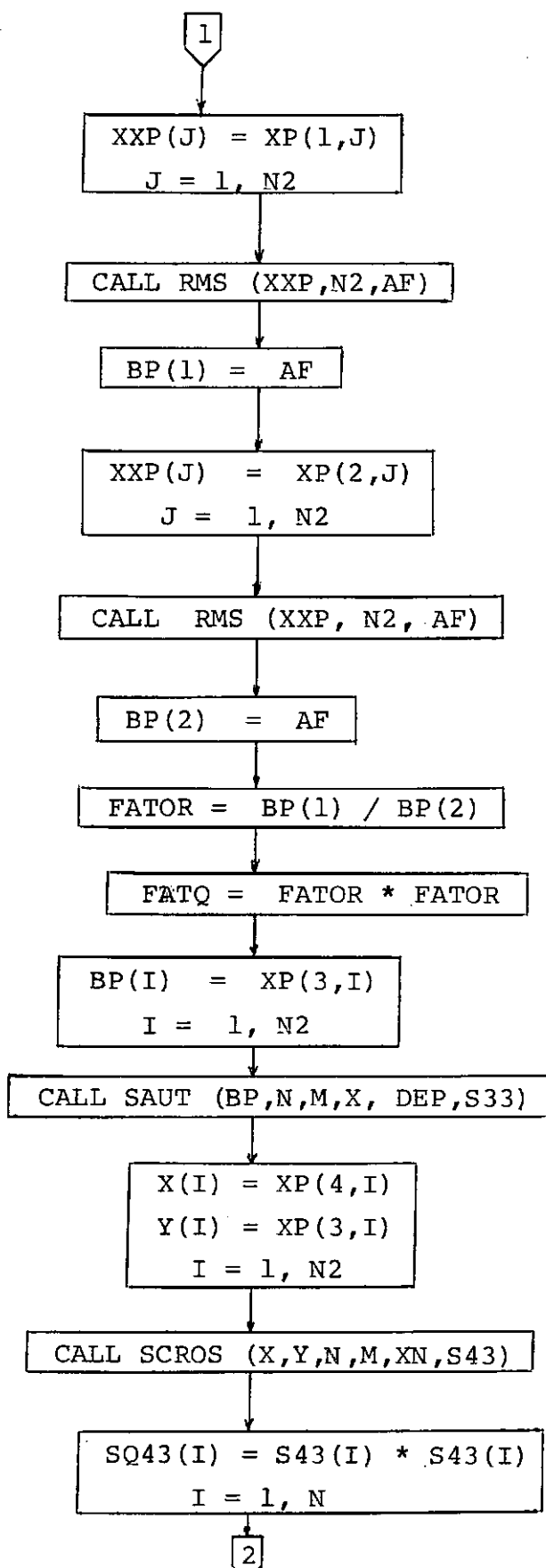


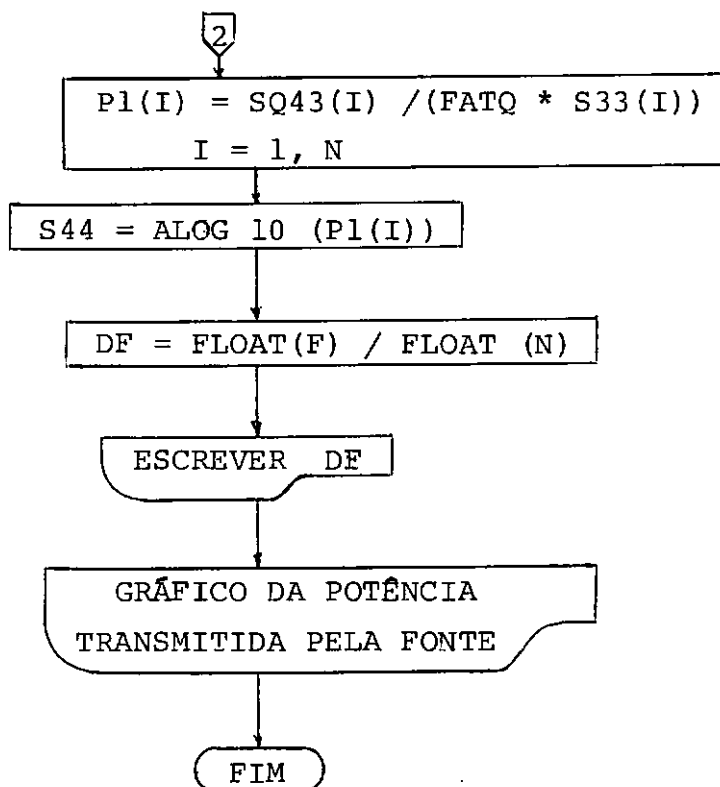


$P(f) \longrightarrow$ Contribuição Sonora

III.6.3. - DIAGRAMA DE BLOCO DO PROGRAMA COPEN





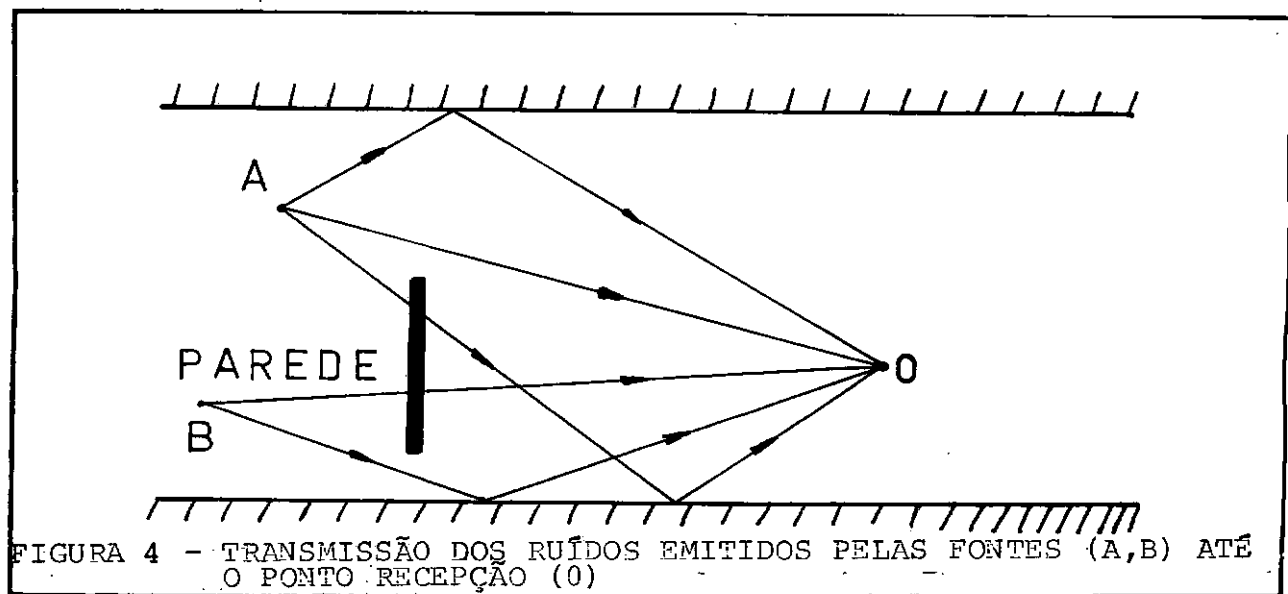


CAPÍTULO IV

ESTUDO POR CEPSTRUM DE UM SISTEMA A ECO

IV.1.1.- DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

Em geral, temos em acústica, o problema da redução de ruídos existentes em locais de várias fontes. Estes ruídos vão ser transmitidos e repetidos até chegar ao ponto de observação (0), na figura abaixo:



A determinação dos caminhos de propagação, pode ser feita a partir do estudo dos tempos de propagação. Estimaremos estes tempos, utilizando as funções de correlação e o cepstrum.

Seja o sinal propagado da forma:

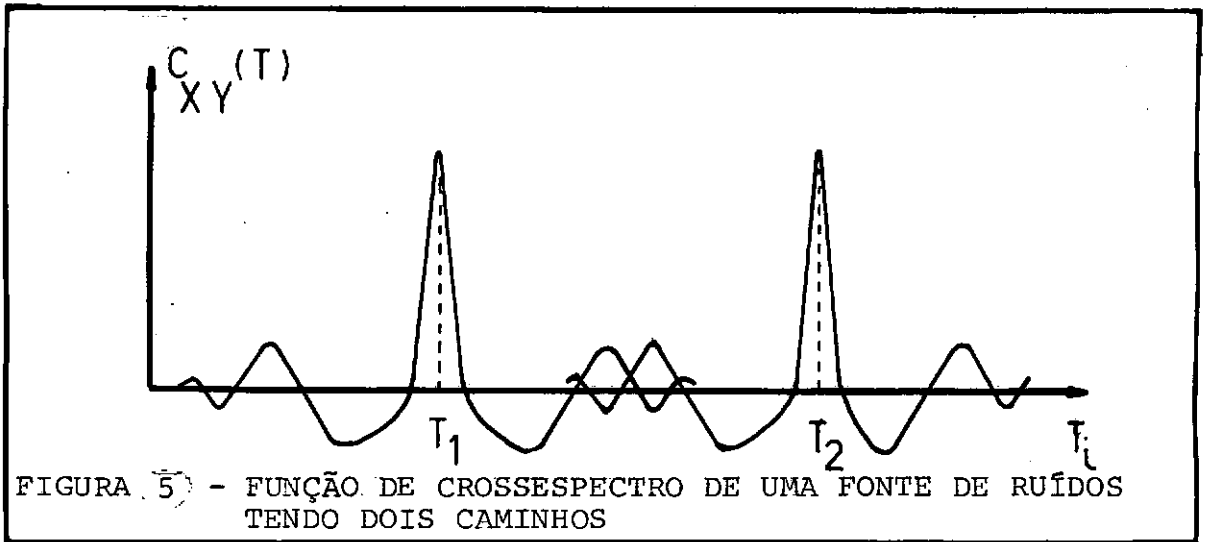
$$Y(t) = aX(t-T_1)$$

onde a é pequeno e T_1 um atraso, então:

$$C_{XY}(T) = E \{X(t) a X(t+T-T_1)\}$$

$$C_{XY}(T) = a C_{XX}(T-T_1)$$

No caso de 2 caminhos de propagação, a função de correlação apresenta um pico para valores de T igual a T_1 e $T=T_2$ conforme figura abaixo:



Podemos ver que a resolução é ligada à largura da função de correlação. Será melhor a resolução para um ruído de função de correlação estreita (ruído de largo espectro).

Estimaremos agora para os tempos de propagação, pelo cepstrum ponderado.

Seja o sinal propagado da forma:

$$Y(t) = a_1 X(t-T_1) + a_2 X(t-T_2) + \dots + a_i X(t-t_i)$$

Seja $Z(t)$ tal que:

$$Z(t) = b x(t) + y(t)$$

$$S_{ZZ}(f) = (h(f))^2 S_{XX}$$

$$\begin{aligned} (h(f))^2 = & \left| b^2 + \sum_i a_i^2 \right| + 2b \sum_i a_i \cos 2\pi f t_i + \\ & + \sum_{i \neq j} a_i a_j \cos 2\pi f (T_i - T_j) \end{aligned}$$

$$\log (S_{ZZ}(f)) = \log |S_{XX}(f)| \left(b^2 + \sum_i a_i^2 \right) +$$

$$\frac{2b}{b^2 + \sum_i a_i^2} \left(\sum_i a_i \cos 2\pi f T_i \right) + \frac{1}{b^2 + \sum_i a_i^2} \sum_{i \neq j} a_i a_j \cos 2\pi f (T_i - T_j)$$

Para $b = 0$ teremos o cepstrum clássico, isto é, obteremos uma saída onde estão representados todos $(T_i - T_j)$.

Para $b \neq 0$ e $\frac{2b}{b^2 + \sum_i a_i^2} \gg a_i a_j$ teremos então o que chamaremos o cepstrum ponderado.

O valor ótimo da constante b é dado pelo valor máximo do fator $\frac{2b}{b^2 + \sum_i a_i^2}$.

Calculando-se o valor máximo deste fator chegamos a conclusão que quando:

$$b = \sqrt{\sum_i a_i^2}, \quad b \text{ assume o valor máximo.}$$

Pela análise cepstral, podemos separar os componentes da equação (1). Como resultado do cepstrum ponderado, temos picos para os valores da quefrência T_i e um pico em baixa frequência. Esta solução em quefrência depende diretamente do parâmetro b de ponderação, isto é, uma escolha correta de b melhora a solução em quefrência.

Desprezando os pontos próximos da origem, obteremos apenas a função que nos dão o tempo de propagação para cada caminho. Multiplicando-se o tempo de propagação pela velocidade dos ruídos no meio de propagação, teremos as fontes.

IV.2. - EXPERIÊNCIA REALIZADA

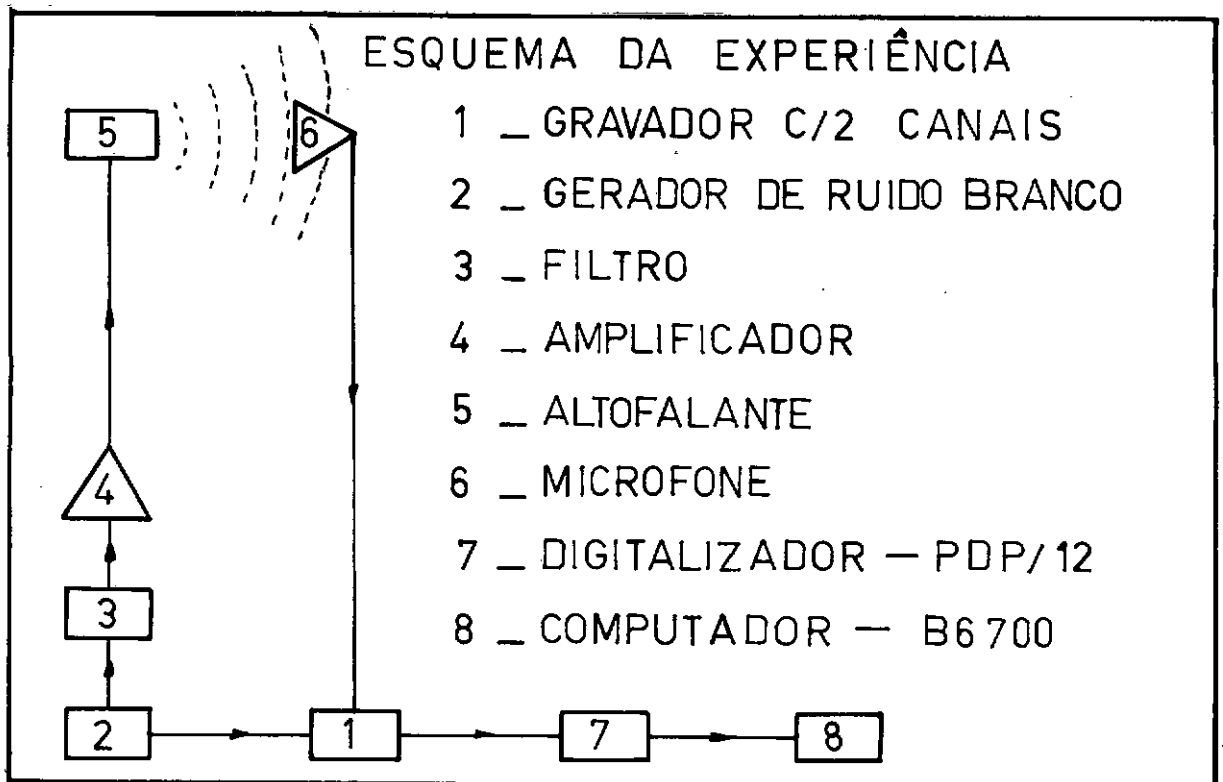


FIGURA 6 - ESQUEMA DA EXPERIÊNCIA PARA ESTUDO DE SISTEMAS A ECO

Iniciamos a experiência pelo gerador de ruído branco, este envia o sinal para o altofalante e para um dos canais do gravador.

O sinal enviado para o altofalante é filtrado e amplificado. Esta filtragem é devida à digitalização que ocorrerá numa 2.^a fase da experiência. O intervalo de frequências é de 0.4 a 10 KHz.

O sinal emitido pelo altofalante é captado por um microfone situado a uma distância aproximada de 25cm. No outro canal do gravador, grava-se o sinal vindo do microfone.

Numa 2.^a fase da experiência, digitalizamos ambos os sinais com uma frequência de 64 KHz no PDP-12. Em seguida, entramos com este dado no B6700 utilizando o programa CEPST.

Como resultado, obtivemos os seguintes gráficos:

FIGURA 12

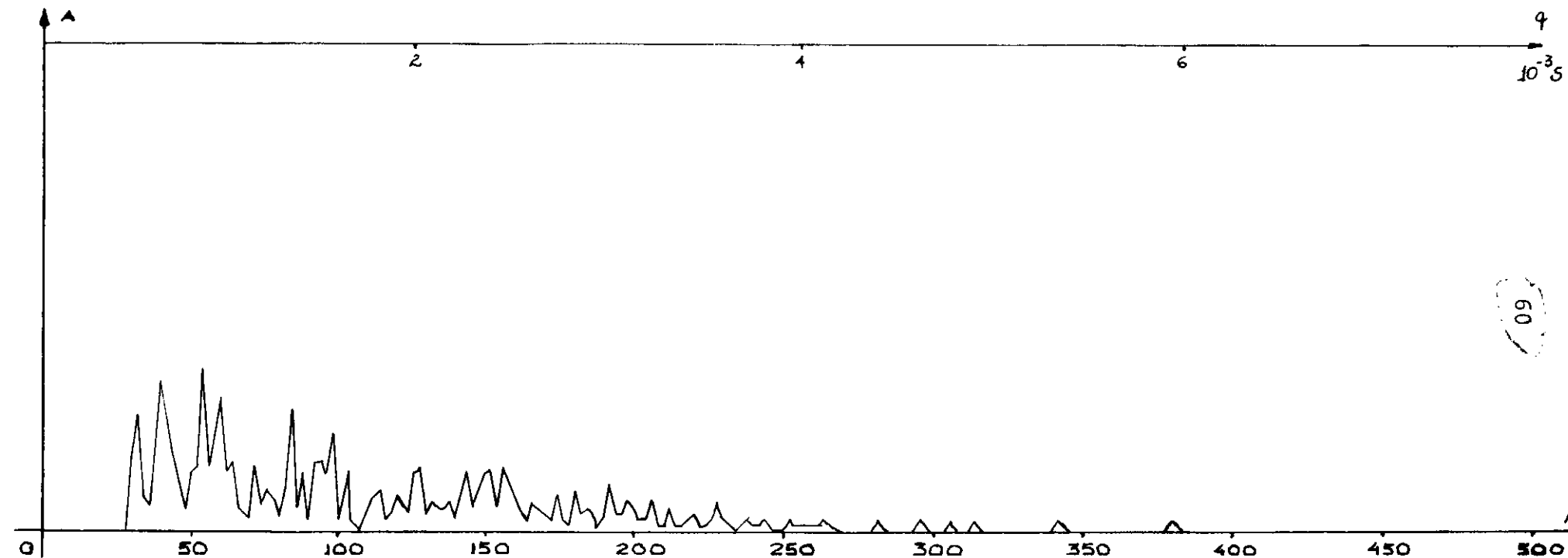
EXPERIÊNCIA DA SALA UTILIZANDO O PROGRAMA CEPST

$N=1024$ $M=10$ $N_3=512$

A CONSTATTE QUE MULTIPLICA O SINAL DE ENTRADA É IQUAL A 1

A CONSTATTE QUE MULTIPLICA O SINAL DE SAIDA É IQUAL A 0

GRÁFICO DO CEPSTRUM



$$q = NP/64000 \text{ (S)}$$

FIGURA 13

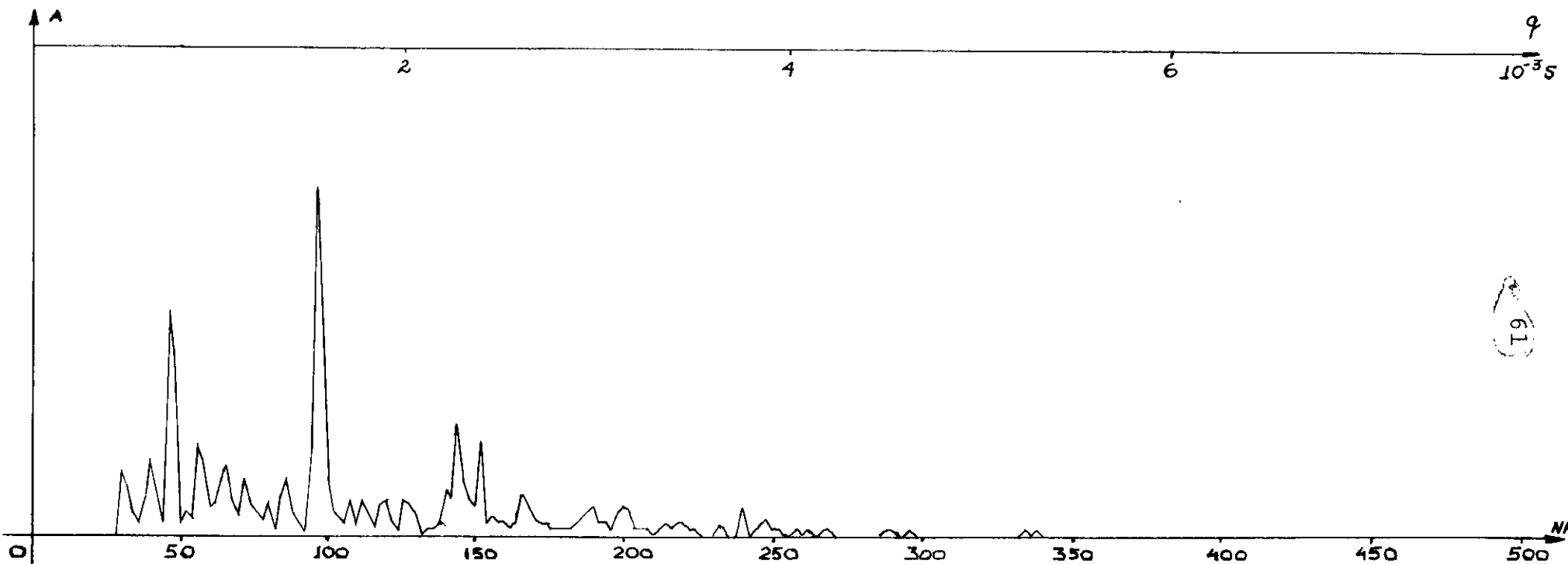
EXPERIENCIA DA SALA UTILIZANDO O PROGRAMA CEPST

$N=1024$ $M=10$ $N3=512$

A CONSTANTE QUE MULTIPLICA O SINAL DE ENTRADA É IQUAL A 0

A CONSTANTE QUE MULTIPLICA O SINAL DE SAIDA É IQUAL A 1

GRAFICO DO CEPSTRUM



$q = NP/64000$ (S)

FIGURA 14

EXPERIÊNCIA DA SALA UTILIZANDO O PROGRAMA CEPST.

$N=1024$ $M=10$ $N3=512$

A CONSTANTE QUE MULTIPLICA O SINAL DE ENTRADA É IGUAL A 1

A CONSTANTE QUE MULTIPLICA O SINAL DE SAÍDA É IGUAL A 1

GRÁFICO DO CEPSTRUM

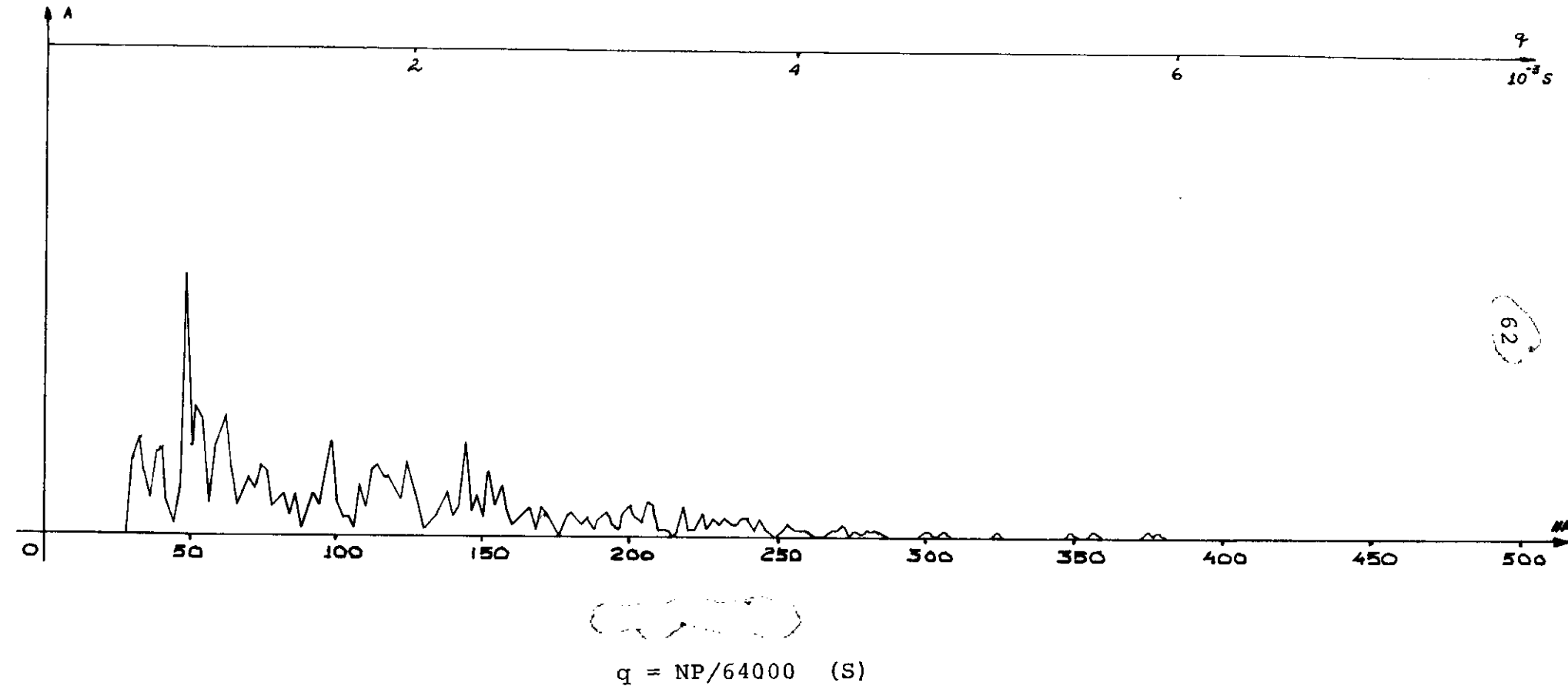


FIGURA 15

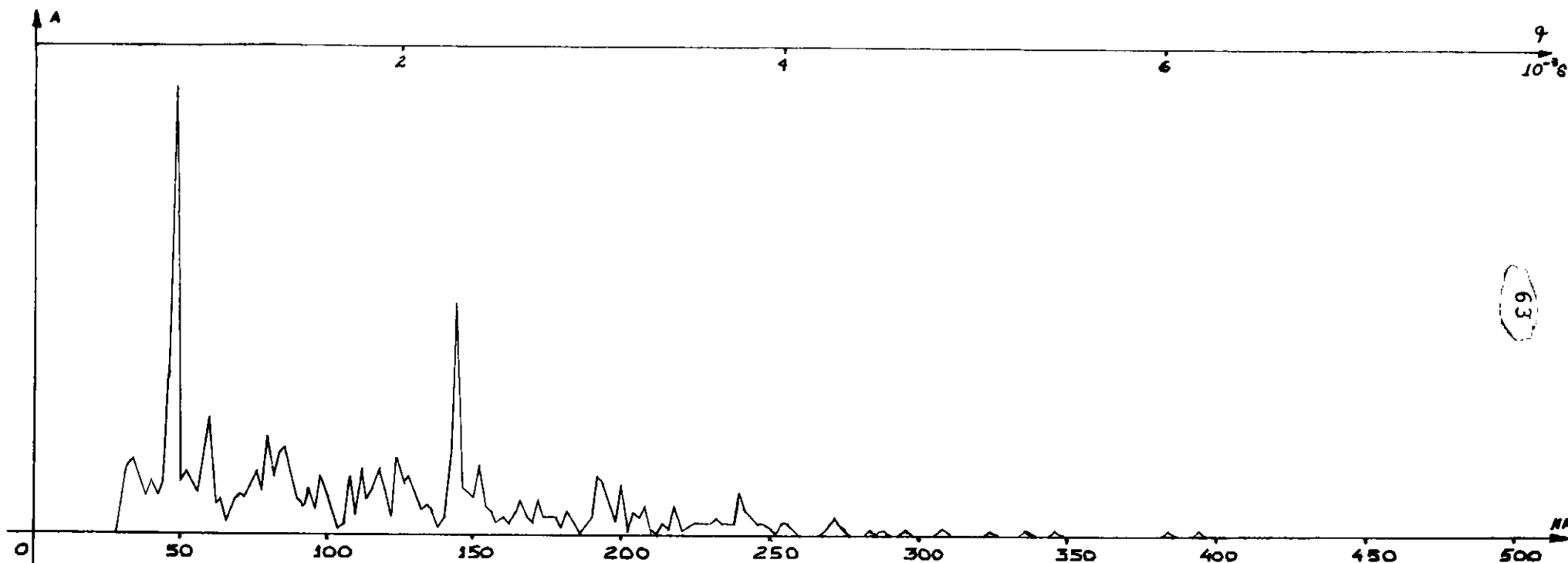
EXPERIÊNCIA DA SALA UTILIZANDO O PROGRAMA CEPST

$N=1024$ $M=10$ $N3=512$

A CONSTANTE QUE MULTIPLICA O SINAL DE ENTRADA É IQUAL A 1

A CONSTANTE QUE MULTIPLICA O SINAL DE SAÍDA É IQUAL A 2

GRÁFICO DO CEPSTRUM



$$q = NP/64000 \quad (S)$$

FIGURA 16

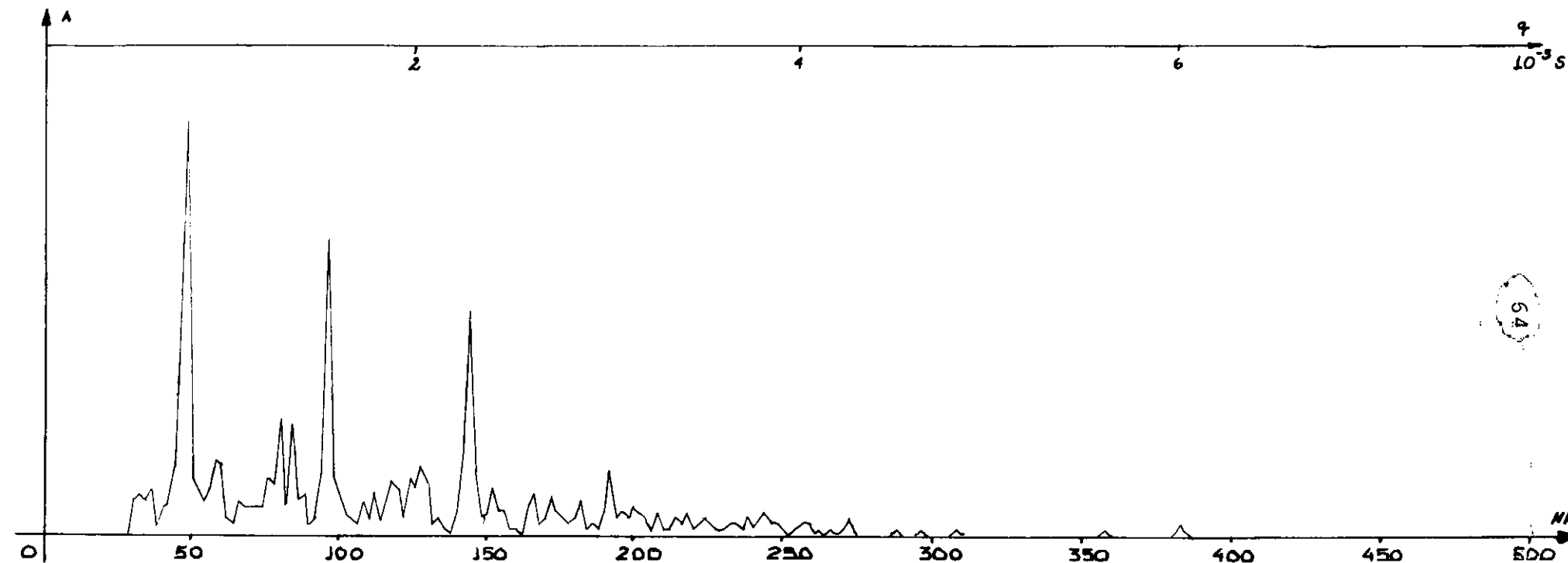
EXPERIÊNCIA DA SALA UTILIZANDO O PROGRAMA CEPST.

N=1024 M=10 N3=512

A CONSTANTE QUE MULTIPLICA O SINAL DE ENTRADA É IQUAL A 1

A CONSTANTE QUE MULTIPLICA O SINAL DE SAÍDA É IQUAL A 3

GRÁFICO DO CEPSTRUM



$q = NP/64000 (S)$

FIGURA 17

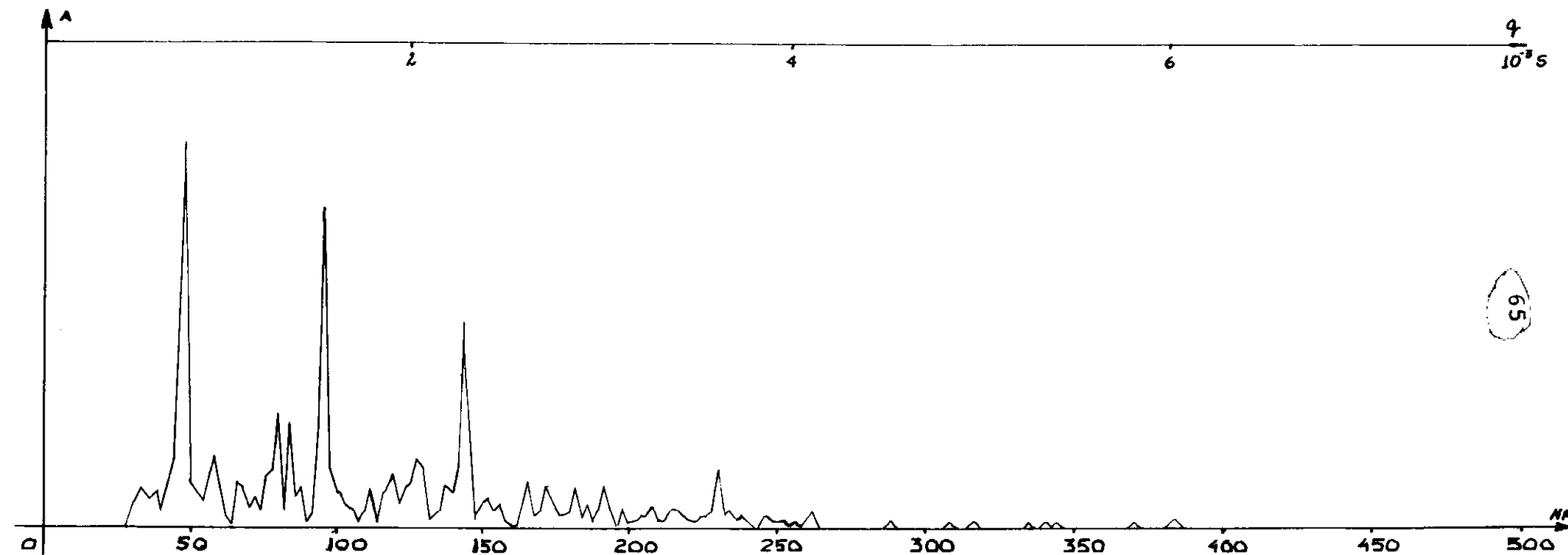
EXPERIÊNCIA DA SALA UTILIZANDO O PROGRAMA CEPST

$N=1024$ $M=10$ $N3=512$

A CONSTANTE QUE MULTIPLICA O SINAL DE ENTRADA É IQUAL A 1

A CONSTANTE QUE MULTIPLICA O SINAL DE SAÍDA É IQUAL A 4

GRÁFICO DO CEPSTRUM



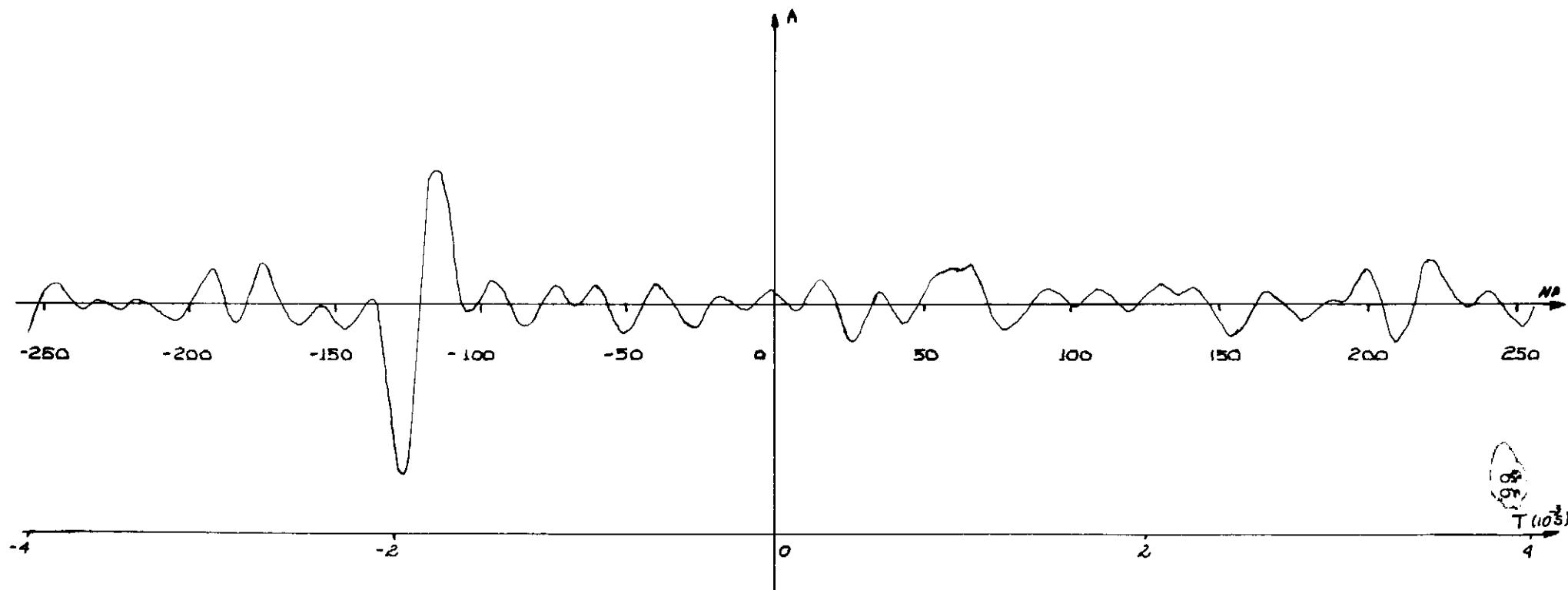
$$q = NP/64000 \quad (S)$$

FIGURA 18

EXPERIÊNCIA DA SALA UTILIZANDO O PROGRAMA CROSS

$N=2048$ $M=11$ $N3=1024$

GRÁFICO DA CROSSCORRELAÇÃO C_{xy}



$$T = NP/64000 \quad (S)$$

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Com base nas teorias de Goff^{|7|}, Cooley^{|8|} e Noll^{|2|}, foi possível elaborar um método para estimação de funções de correlação, espectro e cepstrum.

Este trabalho apresentou vários aspectos da utilização do processamento do sinal em metrologia acústica e em vibração.

A utilização do computador no processamento de sinais vai muito além das possibilidades apresentadas pelos sistemas analógicos de análise existentes.

Em particular aplica-se muito bem na análise espectral de um sinal de baixa frequência como as vibrações de um navio, que é extremamente onerosa por métodos analógicos.

No estudo do cepstrum ponderado o modelo usado é bastante simples e a solução obtida é suficiente.

O método do cepstrum ponderado demonstrou ser um instrumento eficaz na análise de sistemas de propagação. Este método também poderá ser utilizado nos seguintes problemas:

- a) Estudo acústico de conjuntos arquitetônicos;
- b) Estudo da propagação em meio urbano;
- c) Pesquisas na detecção de recursos minerais, tais como lençóis

petrolíferos e minas em geral.

Seria útil também uma análise com a finalidade de depurar os estimadores apresentados.

BIBLIOGRAFIA

- | 1| MERCER, C. A., "Note on digital estimation of correlation function", Journal of sound and vibration, 27(2), 1973, pp 262-265
- | 2| NOLL, A. R., "The cepstrum and some relatives", Journal of sound and vibration, 41(2), 1967, pp 293-309
- | 3| GOLD, B., RADER, C. M., "Discrete Fourier transform", Digital processing of signal, Mc Grow-Hill
- | 4| ACHILES, D., "Fast Fourier transform", COPPE, 1974
- | 5| COOLEY, J. W., LEWIS, P. A. W., "The fast Fourier transform" Journal of sound and vibration, 12(3), 1970, pp 315-337
- | 6| CRANDALL, S. H., "Vibrations Alegtaires", M.I.T., Cambridge U.S.A.
- | 7| GOFF, K.W., "The application of correlation techniques to some acoustic measurements", JASA, 27(2), 1955
- | 8| COOLEY, J. W. "The application of the fast Fourier transform algorithm to the stimation os espectra and cross-spectra", Journal of sound and vibration, 12(3), 1970, pp 339-352

- | 9 | MAX, J., "Traitement du signal", Tomo I, Masson et C^{ie}
Éditeurs
- | 10 | RANDALL, R. B., "Vibration signature analysis-techniques
and instruments systems" - Noise, shock and vibration
conference, Monash University, Melbourne, 1974
- | 11 | SERRÃO, J.B.E., SLAMA, J. G., "Estudo por cepstrum pondera-
do de um sistema a eco", III Congresso Brasileiro de En-
genharia Mecânica, A-8, pp 113-122, COPPE/UFRJ, Rio, Brasil
1975
- | 12 | SERRÃO, J. B. E., SLAMA, J. G., "Propagação de ruídos e vi-
brações em navios - aplicação de técnicos digitais", IV Con-
gresso Pan-Americano de Engenharia Naval, Lima, Perú, 1975

ÍNDICE DAS FIGURAS

Nº	TÍTULO	PÁG.
1	Exemplo de função aleatória	4
2	Fluxograma para o cálculo das funções de <u>auto</u> correlação e de autoespectro	18
3	Partição de uma função aleatória em várias ou tras menores	25
4	Transmissão de ruídos emitidos pelas fontes (A e B) até o ponto de recepção (0)	55
5	Função de crossespectro de uma fonte de ruídos tendo dois caminhos	56
6	Esquema da experiência para estudo dos sistemas a eco	58
7	Experiência da sala utilizando o programa CEPST	60
8	Experiência da sala utilizando o programa CEPST	61
9	Experiência da sala utilizando o programa CEPST	62
10	Experiência da sala utilizando o programa CEPST	63
11	Experiência da sala utilizando o programa CEPST	64
12	Experiência da sala utilizando o programa CEPST	65
13	Experiência da sala utilizando o programa CROSS	66

APÊNDICE 1

DIGITALIZAÇÃO

1. 1. - PDP-12 - PROGRAMA HFDIGIT

Toda a nossa pesquisa baseia-se no fato de utilizarmos um gravador para armazenar os dados, isto é, as funções temporais obtidas durante as experiências.

Como essas funções são analógicas, é necessário transformá-las em funções que as representem por pontos, para podermos utilizar os computadores digitais comuns.

O P.D.P.-12 é um mini-computador de 8K que contém um conversor analógico-digital.

Este computador carregado com o programa HFDIGIT , tem capacidade de digitalizar até uma frequência máxima de 100 KHz.

O sinal analógico com o qual entramos no mini-computador deverá oscilar entre -1V a +1V. Saindo destes limites, poderemos perder informações do sinal (vide item 26).

II

Apresentamos uma pequena descrição do modo de utilizar o PDP-12 (existente no laboratório da Biomédica).

1- Ligam-se as chaves:

A - PDP em ON

B - TELETYPE em LINE

C - Potenciômetro do DISPLAY (tela) a 3/4.

2- Coloca-se uma fita magnética que contenha o programa HFDIGIT na unidade da esquerda

3- Numera-se a unidade da esquerda com zero.

4- Colocam-se todas as chaves do console na posição \uparrow (O)

5- Colocam-se as RIGHT SWITCHES (RWS) na seguinte posição:

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
\uparrow O	\uparrow O	\downarrow O	\uparrow O	\downarrow O	\uparrow O	\downarrow O	\downarrow O	\downarrow O	\uparrow O	\uparrow O	\uparrow O	CHAVES

6- Colocam-se as LEFT SWITCHES (LSW) na seguinte posição:

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
\uparrow O	\uparrow O	\uparrow O	\downarrow O	\downarrow O	\downarrow O	\uparrow O	\uparrow O	\uparrow O	\uparrow O	\uparrow O	\downarrow O	CHAVES

7- Aperta-se a tecla DO, no console

8- Espera-se a fita parar e verifica-se se todas as luzes do acumulador estão acesas (7777). Se problema venhá a ocorrer

daqui para frente, recomeça-se a operação no ítem 4,

9- Se tudo estiver OK, aperta-se a tecla START 20 no console. O DISPLAY apresentará um final de programa.

10- Aperta-se a tecla LINE-FEED na TELETYPE, e, em seguida bate-se na mesma:

LO \emptyset HFDIGIT,

onde \emptyset representa um espaço em branco.

11- Se a última linha da tecla estiver do seguinte modo:

→ LO \emptyset HFDIGIT,

aperta-se a tecla RETURN na TELETYPE, até aparecer o seguinte quadro:

***..HFDIGIT...*

FREQ: \emptyset a 100 KHZ

CANAIS ANALOG 10 e 11

DISPARO AMOSTRAGEM: CONT

RSW = | 100 KHZ/FAM | -1

aperte C na TELETYPE.

12- Nesta altura tem-se de fazer o seguinte cálculo:

$$I = \left| \frac{100 \text{ KHZ}}{\text{FAM}} \right| - 1$$

FAM - frequência superior com a qual mostraremos o sinal. Pelo teorema de Nyquist esta frequência deverá ser no mínimo 2 vezes maior que a frequência máxima a analisar. Na prática recomen

da-se que seja da ordem de 4 a 6 vezes a frequência máxima a analisar.

A unidade de FAM é KHz. I deverá ser transformado em octal, isto é deverá ser passado para a base 8.

Por exemplo, se temos um sinal cuja frequência máxima a analisar seja 1 KHz, usando o índice 4, FAM será 4KHz; logo

$$I = \left\lfloor \frac{100 \text{ KHz}}{4 \text{ KHz}} \right\rfloor - 1 = 24$$

24 na base 10 é igual a 30 na base 8.

Colocaremos a seguir este número 30 em binário na RSW e esta ficará assim:

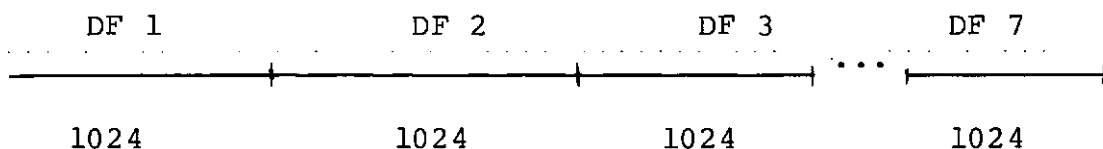
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↓	↓	↓	↓	↑	CHAVES
0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	BINÁRIO
												OCTAL
												30

15- A frequência máxima a analisar é selecionada por meio de filtros colocados na saída do gravador.

16- Devemos verificar pelo osciloscópio se as saídas destes filtros estão no intervalo $[-0,8V, 0,8V]$. Caso estejam fora de faixa, usaremos potenciômetros nas saídas para que o máxi-

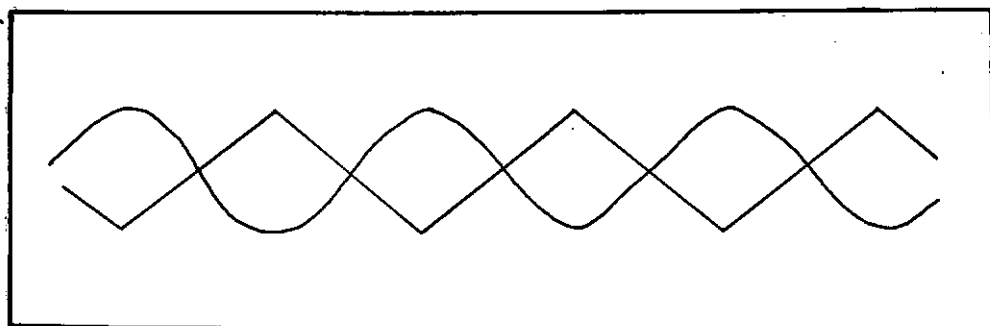
mo de sinais entrem neste intervalo.

- 17- Liga-se o sinal 1 no canal analógico 10 e o sinal 2 no canal 11.
- 18- Coloca-se o gravador um pouco antes do início do sinal que se quer digitalizar.
- 19- Aperta-se a tecla C na TELETYPE. O DISPLAY desaparecerá e o computador ficará parado aguardando o disparo.
- 20- Liga-se o gravador e acompanha-se o sinal pelo osciloscópio, ou pela marcação do gravador. No momento desejado, dispara-se o computador apertando a tecla CONT no console.
- 21- Neste instante, o PDP digitalizará 7168 pontos dos 2 sinais.
- 22- Estes pontos estão armazenados na memória da seguinte forma:



Os pontos estão armazenados alternadamente, isto é, um ponto do sinal 1, outro do sinal 2, novamente um do sinal 1 e assim por diante. O primeiro ponto é sempre do sinal 1.

- 23- Para permitir a verificação dos sinais digitalizados antes de perfurá-los em fita de papel, estes são apresentados no DISPLAY. Se digitalizarmos um senóide e um sinal triangular aparecerá o seguinte quadro:



POT \emptyset : + x

SNS: 1000x

RETORNO: R

PERFURA: C

24- O DISPLAY apresentará 512 pontos (256 por canal) que é a capacidade máxima da tela. Para varrermos todo o sinal, o potenciômetro 0 (zero) do PDP deslocará a janela de até 512 pontos colocando todo à mostra o DATA FIELD (DF)

25- Para projetar os demais segmentos de 1024 pontos, podemos selecioná-los dos SENSE SWITCHES (SNS) do console, da seguinte forma:

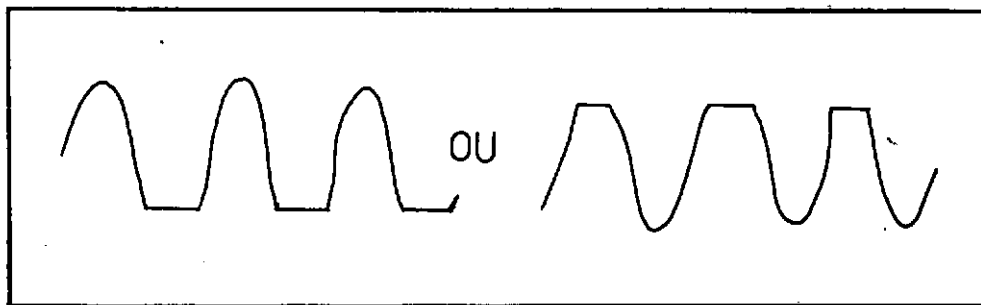
TODAS	SNS = 0	DF 1
	SNS (0) = 1	DF 2
	SNS (1) = 1	DF 3
	SNS (2) = 1	DF 4
	SNS (3) = 1	DF 5
	SNS (4) = 1	DF 6
	SNS (5) = 1	DF 7

SNS(i) = 1 → CHAVE LIGADA

$SNS(i) = 0 \rightarrow$ CHAVE DESLIGADA

Se mais de uma estiver ligada, prevalece a de maior número.

26- Se o sinal do DISPLAY tiver uma das seguintes formas:



isto demonstra que um dos sinais está fora do intervalo

| -1V , 1V |

27- Caso esta amostragem não nos satisfaça aperta-se a tecla R na TELETYPE e volta-se ao item 12.

28- Se desejarmos perfurar a fita de papel, aperta-se a tecla C na TELETYPE e surge o seguinte quadro no DISPLAY:

PREPARE A FITA DE PAPEL

TELETYPE EM LINE

PERFURADORA EM ON

TEMPO 28 MINUTOS

INÍCIO C TELETYPE

29- Coloca-se a fita de papel na perfuradora, deixando no início um espaço de aproximadamente 40 cm.

30- Verifica-se se a TELETYPE está em LINE.

VIII

31- Verifica-se se a PERFURADORA está em ON.

32- Aperta-se C na TELETYPE

33- A fita começará a ser perfurada, e esta operação levará 28 mi nutos. Após estes, o programa voltará ao ítem 9.

Depois desta rápida demonstração de como operar o PDP-12, segue a listagem do programa HFDIGIT em sua versão final.

```

[ HF DIGIT
[ AMOSTRAGEM E DIGITALIZACAO
[ SIMULTANEA DOS CAD 10 E 11
[ FREQUENCIA AMOSTRAGEM CONTRO-
[ LADA PELA RSW - VARIÁVEL DE
[ 0 A 100KHZ
[ NUMERO DE PUNTOS AMOSTRADOS:
[ 7 X 1024 - DATA FIELDS 1 A 7
[ DISPLAY DO SINAL AMOSTRADO COM
[ CONTROLE DOS DÍNAS SNS 0 A 5
[ SAÍDA EM FITA PERFURADA COM O
[ SEGUINTE FORMATO: 32 ESPACOS
[           1 START
[           6 BITS POR VEZ
[           1 START
[           32 ESPACOS
[ ESTEVAM .
[ 25\01\75
[
[
[
[
[ .....]
[ TRANSFERENCIA]
[ PARA O 1º 0 ]
[ .....]
[       $1
[       SET & 2
[       2017
[       SET & 3
[       17
[       UMB 0
[       LDA & 3
[       STA & 2
[       XSK 3
[       JMP '-3
[       UMB 1
[       LMB 0
[       JMP 20
[
[
[
[ .....]
[ INICIO ]
[ .....]
[       $20
[       CLR
[       0004
[ .....]
[ FRAME 1 ]
[ .....]
[       SET & 2
[       5G+3777
[       SET & 4
[       5G-7G
[       JMP 30

```



```
#3B SET & 5
      -6
      SET & 2
      3V-1
      SET & 6
      6R-1
      JMP 6C
      OPR
      6031
      JMP 3B
      OPR
      6036
      SAE &
      303
      JMP 3B
[.....]
[AMOSTRAGEM ]
[.....]
#3K CLR
      OPR
      6132
      OPR
      6135
      RSW
      COM
      OPR
      6133
      LDA&
      0300
      OPR
      6134
      LDA&
      2100
      OPR
      6132
      UMB 1
      HLT
      JMP 2C
      UMB 2
      JMP 2C
      UMB 3
      JMP 2C
      UMB 4
      JMP 2C
      UMB 5
      JMP 2C
      UMB 6
      JMP 2C
      UMB 7
      JMP 2C
      JMP 30
#2C LDA
      0
      STC 2Z
      SET&2
      3777
      OPR
```

```

        6131
        JMP 1-2
        OPR
        6135
        SAM 10
        STA&2
        SAM 11
        STA&2
        XSK 2
        JMP 2C+5
#2Z JMP 1
[.....]
[ FRAME 2 ]
[.....]
#3Q SET & 2
      5H+3777
      SET & 4
      5H-7H
      JMP 30
[.....]
[DISPLAY FRAME 2 E DADOS]
[.....]
#3A UMB 1
      0460
      UMB 2
      0461
      UMB 3
      0462
      UMB 4
      0463
      UMB 5
      0464
      UMB 6
      0465
      UMB 7
      SAM 0
      APO
      CLR
      ADA &
      2000
      STC 12
      SET & 13
      0
#3Z LDA & 12
      SCR 1
      DIS & 13
      LDA
      13
      SAE &
      1000
      JMP 3Z
      SET & 5
      -2
      SET & 2
      3Y-1
      SET & 6
      6R-1

```

```

      JMP 6C
      OPR
      6031
      JMP 3A
      OPR
      6036
      SAE &
      303
      JMP '+2
      JMP 7A      [FRAME 3
      SAE &
      322
      JMP 3A
      JMP 20 [JMP RETURN0
[.....]
[ FRAME 3 ]
[.....]
#7A SET & 2
      51+3777
      SET & 4
      51-71
      JMP 30
#7B SET & 5
      -5
      SET & 2
      3V-1
      SET & 6
      6R-1
      JMP 6C
      OPR
      6031
      JMP 7B
      OPR
      6036
      SAE &
      303
      JMP 7B
[.....]
[ PUNCH ]
[.....]
      JMP 3P      [32 ESPACOS
      LDA &      [START
      201
      JMP 6P
      UMB 1
      JMP 4C
      UMB 2
      JMP 4C
      UMB 3
      JMP 4C
      UMB 4
      JMP 4C
      UMB 5
      JMP 4C
      UMB 6
      JMP 4C
      UMB 7

```

```

        JMP 4C
        LDA &
        201
        JMP 6P
        JMP 3P
        0701      [RESTART LAP-6
        1270
        JMP 20
[.....]
[ESPACEJAMENTO]
[.....]
#3P SET & 4
      -40
      LDA
      0
      STC '+5
      CLR
      JMP 6P
      XSK & 4
      JMP '-3
      JMP '
[.....]
[PUNCH DF 1 A 7 ]
[.....]
#4C LDA
      0
      STC 4W
      SET & 2
      6000
      SET & 3
      -2000
      SET & 4
      -2
#5U LDH & 2
      BSE &
      0200
      JMP 6P
      XSK & 3
      JMP 5U
      XSK & 4
      JMP 5U
#4W JMP '
[.....]
[ PUNCH ACC ]
[.....]
#6P STC '+5
      LDA
      0
      STC 6Z
      LDA &
      XXXX
      OPR
      6041
      JMP '-2
      OPR
      6046
#6Z JMP '

```

```

[.....]
[  DISPLAY  ]
[.....]
#6C LDA
    0
    STC 9Z
    SET & 3
    -26
    SET & 1
    200
    LDA&2
    LDA 2
    DSC&6
    DSC&6
    LDA&
    4
    ADM
    1
    XSK&3
    JMP 6C+10
    XSK&5
    JMP 6C+3
#9Z JMP '
[=====]
[ ORDENACAO ]
[=====]
#30 LDA
    0
    STC 40
    SET&3
    6R-1
    SET&12
    -2
    LDH&2
    STC 7
    LDA
    7
    ADM
    7
    ADA&
    2R
    STC 7
    LDA 7
    STA&3
    LDA&7
    STA&3
    XSK&12
    JMP 30+7
    XSK&4
    JMP 30+5
#40 JMP '
[=====]
[  MENSAGENS  ]
[=====]
#5G ↑####.. HFDIGIT ..*##;
    ↑FREQ: 0 A 100 KHZ      ;
    ↑CANAIS ANALOG 10 E 11;

```

```

      ↑DISPARO AMOSTRG: CONT;
      ↑ RSW =[100KHZ\FAM]-1 ;
      ↑APERTE C NA TELETYPE ;
#7G XXXX
#5H ↑POT 0: +X   SNS: 1000X;
      ↑RETORNO:R   PERFURA:C;
#7H XXXX
#5I ↑PREPARE FITA DE PAPEL;
      ↑TELETYPE EM ↑LINE↑   ;
      ↑PERFURADORA EM ↑UN↑   ;
      ↑TEMPO: 28 MINUTOS   ;
      ↑INICIO: C NA TELETYPE;
#7I XXXX
[=====]
[ ALTURAS ]
[=====]
#3V 160
      60
      20
      -17
      -117
#3Y -357
      -377
[=====]
[ ALFABETO ]
[=====]
#2R 4536
      3651
      2101
      0177
      4523
      2151
      4122
      2651
      2414
      0477
      5172
      0651
      1506
      4225
      4443
      6050
      5126
      2651
      5122
      3651
      0
      0
      0
      0
      0
      5217
      5752
      5117
      5751
      0404

```

0404
0404
0437
7500
0000
7777 (#
7777
0
0
4477
7744
5177
2651
4136
2241
4177
3641
4577
4145
4477
4044
4136
2645
1077
7710
7741
0041
4142
4076
1077
4324
0177
0301
3077
7730
3077
7706
4177
7741
4477
3044
4276
7643
4477
3146
5121
4651
4040
4077
0177
7701
0176
7402
0677
7701
1463
6314

0770

7007

4543

6151

0

0

0

0

4020

2055

1212

1212

4276

4243

0500

0006

0077 [* MODIFICADO

0000

0

0

4177

0000

0

0

7000

0070

0

0

0412

2100

0021

1204

0000

7741

7777 [* MODIFICADO

0000

2200

0000 [FIM

#6R XXXX

1. 2. - PROGRAMA PARA PASSAR DE FITA DE PAPEL PARA CARTÕES

Do PDP-12, a saída é feita em fita de papel perfurada , por isso há necessidade de transferir os dados para cartões.

Como a fita contém 2 sinais perfurados alternadamente, conserva-se isto nos cartões. O formato escolhido para o caso em questão foi 16I5, sendo 8 dados de cada sinal por cartão. Em geral, para cada digitalização obtém-se aproximadamente 450 cartões.

Existe um programa com 2 subrotinas que faz esta transferência. As subrotinas são: WCONV e RTAPE.

O programa funciona da seguinte forma: o principal inicia, chama a RTAPE e finaliza o programa após ler toda fita.

A RTAPE imprime o cabeçalho, chama a WCONV para que leia 16 dados na fita e os converta à base 10.

Após convertidos os 16 dados, a WCONV os remete para RTAPE que perfura o cartão e imprime o número e os dados deste cartão na listagem. Este sistema foi montado para que nos possamos precaver, se perdermos a ordem dos cartões, uma vez que estes, ao serem obtidos, não trazem impressa a sua ordem. São apenas perfurados.

Concluída esta etapa, novamente a RTAPE refaz o

ciclo, lendo 16 dados, perfurando-os e imprimindo-os na listagem até converter toda a fita de papel.

Em seguida teremos a listagem do programa e das duas subrotinas.

```
// ASM
*LIST
```

WCONV	ENT	WCONV
	DC	*-*
	LIBF	PAPTX
	DC	/1120
	DC	AREA
	DC	ERROR
	LIBF	PAPTX
	DC	/0120
	B	*-3
	LD	AREA+1
	SRA	8
	EOR	FLAG
	BSC	Z
	B	WCONV+1
	LD	DESV
	STO	WCONV+1
	LD	D20
	STO	AREA

IN	LIBF	PAPTX
	DC	/1100
	DC	AREA
	DC	ERROR
	LIBF	PAPTX
	DC	/0100
	B	*-3
	LDX	1 -16
	LD	I WCONV
	STO	K1+1
	LDX	2 0
KX1	LD	L1 AREA+17
	SRT	6
	SRA	2
	SLT	6
	BSC	Z+
	NOP	
	SLA	5
	SRA	5
	BSC	C

K1	S		D3777
	STO	L2	*-*
	MDX	2	-1
	NOP		
	MDX	1	1
	B		KX1
FIM	LD		WCONV
	STO	L	2
	LD		D20
	A	L	1
	STO	I2	1
	MDX	L	WCONV,2
	BSC	I	WCONV
CESV	B	X	IN-WCONV-2
D3777	DC		/7FF
AREA	DC		1
	BSS		16
FLAG	DC		/81
C20	DC		16
ERROR	DC		*-*

```
LD      *-1  
BSC     I  ERROR  
END  
  
// DUP  
*STORE      WS  UA  WCONV  
  
// FCR  
*ONE WCRC INTEGERS  
*LIST SOURCE PROGRAM  
SUBROUTINE RTAPE(NCART)  
C      ESSA SUBROTINA EXECUTA AS SEGUINTE TAREFAS-  
C      DETECAC AUTOMATICA DO INICIO E FIM DA MASSA  
C      1 DE CACOS PERFURADOS EM FITA DE PAPEL.  
C      LEITURA DOS DADOS.  
C      CONVERSAC OCTAL-DECIMAL.  
C      PERFURACAO EM CARTAO (FORMATO I5 )  
C      NCART=NUMERO PREVISTO DE CARTOES A SEREM  
C      PERFURADOS = NUMERO DE DADOS/8
```

C
C
C
C
C

```

CARGO SE DESEJE CONVERTER TODA A FITA,FAZER
NCART=20000
ESRA SUBROTINA FOI MODIFICADA, POIS SUGIRAM PROBLEMAS AO PERFURAR OS
CARTOES
COPPE-ENGENHARIA MECANICA
JCAC BCSCO ERTAL SERRAO  -*- MARCO DE 1975
DIMENSION JCATA(16)
NUM=16
25 WRITE(2,25)
   FORMAT(72(' '), 'JBES')
   WRITE(5,22)
22  FORMAT(1X,120('*'),/)
   WRITE(5,23)
23  FORMAT(1X,'NUMERO DO CARTAO / ',48X,'DADOS',/)
   WRITE(5,22)
   DO 1 N=1,NCART
   CALL WCONV(JDATA,NUM)
   WRITE(2,20)(JDATA(K),K=1,16)
20  FORMAT(16I5)
   WRITE(5,21)N,(JDATA(K),K=1,16)

```

```
21 FORMAT(7X,I6,5X,'/',16I6)
1 CONTINUE
  RETURN
  END

// DUP
#STCRE      WS  UA  RTAPE

// FCR
*LIST ALL
*ONE WORD INTEGERS
*IOCS(2501READER,1403PRINTER)
      NCART=20000
      CALL RTAPE(NCART)
      CALL EXIT
      END

// XEQ
```

JBES

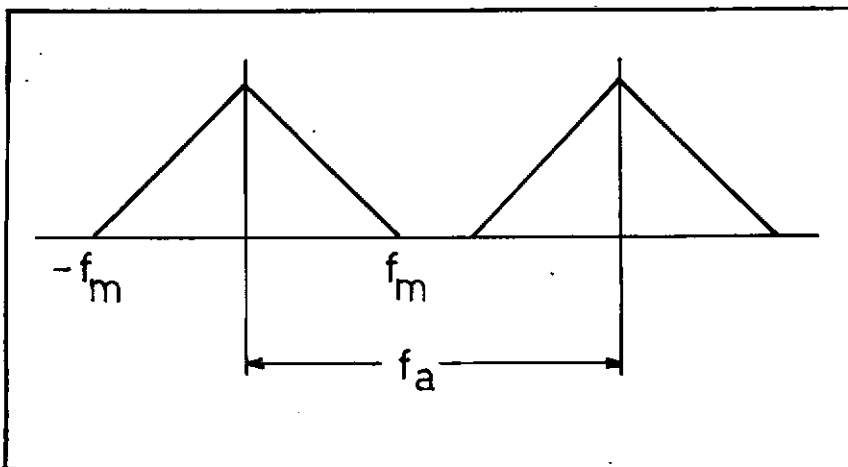
1. 3. - FILTROS USADOS PARA DIGITALIZAR

No ítem 12 do III.1. vimos como ajustar a frequência máxima de digitalização para o PDP, frequência esta, da ordem de 4 a 6 da frequência máxima que queremos analisar.

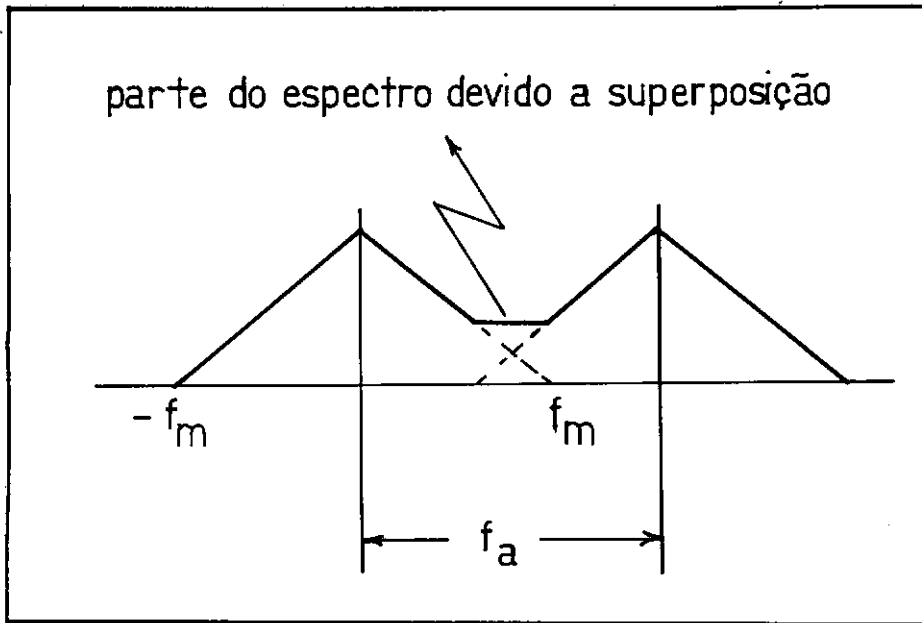
Ao escolhermos estas frequências é preciso ter a garantia de que o sinal em questão não ultrapassará a frequência máxima a analisar. Caso isto ocorra, problemas de "aliasing" serão inevitáveis.

Aliasing é a superposição de espectros que ocorre quando a frequência máxima de amostragem (f_m) é inferior a duas vezes a frequência máxima a analisar (f_a). (Vide figura abaixo)

1º caso $f_a > 2f_m$



2º caso $f_a < 2f_m$



Para evitar o problema de "aliasing", utilizam-se filtros do tipo passa baixa, na saída do gravador, estes cortam o sinal na frequência máxima a analisar, desprezando as frequências superiores.

APÊNDICE 2

2. 1. - SUBROTINAS FFTTF E BITREV

As subrotinas FFTTF e BITREV trabalham em conjunto. A primeira calcula a FFT, mas fora da ordem bittransversa e a segunda ordena os resultados da primeira.

Os argumentos FFTTF são: A, N, M, SIGN.

A deverá ser uma função complexa.

Se quisermos fazer a FFT de uma função real no computador, transformamos esta função real em complexa, definindo a parte imaginária como uma função nula, isto é, preenchemos a parte imaginária com zeros.

N representa o número de pontos. M é tal que obedece à relação:

$$N = 2^m$$

SIGN poderá assumir dois valores:

- (1) Executa a transformada direta
- (-1) executa a transformada inversa

Logo após sairmos da FFTTF utilizamos a BITREV que tem apenas dois argumentos: A e N, já mencionados acima.

```
SUBROUTINE BITREV (A,N)
  DIMENSION A(N)
  COMPLEX A,T
  NV2=N/2
  NM1=N-1
  J=1
  DO 7 I=1,NM1
    IF(I.GE.J) GO TO 5
    T=A(J)
    A(J)=A(I)
    A(I)=T
5  K=NV2
6  IF (K.GE.J) GO TO 7
    J=J-K
    K=K/2
    GO TO 6
7  J=J+K
  RETURN
END
```

C
C
C
C

```

SUBRCUTINE FFTTF(A,N,M,SIGN)
SIGN = 1. FOR FFT , SIGN = -1. FOR IDFT
FFT ROUTINE FOR COMPLEX DATA STORED IN  COPLEX ARRAY A
CUT IN BITREVERSED ORDER
N=2**M
DIMENSION A(N)
CCOMPLEX A,U,W,T
PI = 4.*ATAN(1.)
DO 20 L =1,M
    L1 =M-L+1
    LE =2**L1
    LE1 =LE/2
    U = (1. , 0.)
    AA = -SIGN*SIN(PI/LE1)
    W = CMPLX (COS(PI/LE1),AA)
    DO 20 J=1,LE1
        CC 10 I=J,N,LE
        IP = 1 + LE1
        T = A(IP)
        A(IP) = (A(I)-T)*U
    
```

```

10 A(I) = A(I) + T
20 U = U*W
   IF (SIGN) 15,15,25
15 DO 22 I=1,N
22 A(I) = A(I)/N
25 CONTINUE
   RETURN
   END

```

2.2. - SUBROTINAS GRAPH E GRAFT

2.2.1. - FINALIDADE E USO

A subrotina GRAFT foi gerada a partir da GRAPH. Ambas têm a mesma entrada, diferindo apenas na saída.

A GRAPH é utilizada para qualquer saída em gráfico e a GRAFT só serve para os gráficos da análise correlacional.

Ao utilizarmos estas subrotinas entramos com o número que desejamos representar em gráfico (LX) e a função adequada para estes pontos (X).

Ambas pesquisam o maior e o menor valor da função. Tomam o maior valor, subtraindo deste o menor e dividem o resultado por 100. Este é o menor valor que as subrotinas podem representar.

Feito isto, ambas começam a montar os gráficos da seguinte forma:

- pegam um ponto, pesquisam se é positivo ou negativo. Se for positivo, deixam a parte negativa em branco e vice versa.

Para o nível zero, elas armazenam um traço vertical, do zero até a função com traços horizontais. No ponto da função armazenam um asterisco.

A subrotina GRAPH imprime o número do índice menos 1, o valor da função para aquele ponto e a representação gráfica correspondente ao valor.

A GRAFT foi gerada a partir da GRAPH com duas finalidades específicas:

A primeira foi decorrente do cálculo correlacional isto é, quando calculamos as funções de correlação, o resultado que obtemos é uma função invertida da seguinte forma: a primeira metade representa a função no intervalo $| 0, \infty |$ e a segunda de $| -\infty, 0 |$.

Era necessário que se invertesse a função para que o intervalo passasse para $[-\infty, \infty]$ e se renumerássemos a função da seguinte forma

$$\{ -(n) , -(n-1) , -(n-2) , \dots , -1, 0, 1, 2, \dots, (n-1) \}$$


```
SUBROUTINE GRAPH(LX,X)
  DIMENSION X(01),IGRAF(101)
  DATA IPONT /'-'/
  DATA IBARRA / 1H /
  DATA IXIX /'*/
  DATA IBR /' '/
  IN=8
  ICUT=5
  XMIN=X(1)
  XMAX=X(1)
  WRITE(IOUT,79)
79  FORMAT(18X,'-----')
  *-----')
  DO 1 K=2,LX
    IF(X(K)-XMIN)80,2,2
80  XMIN=X(K)
    IF(X(K)-XMAX)1,81,81
81  XMAX=X(K)
    1 CONTINUE
    IF(XMIN-XMAX)82,83,83
```

```

82 RANG=XMAX-XMIN
   IF(XMIN.GE.0.)IND1=1
   IF(XMIN.LT.0.)IND1=IFIX(ABS(XMIN*100./RANG+0.5))
   DO 5 K=1,LX
   INC=IFIX((X(K)-XMIN)*100./RANG+C.5)
   IF(IND) 84,20,84
84 IF(INC-101) 22,21,21
22 IF(IND-IND1)4,3,3
   3 DO 12 L=1,101
12 IGRAF(L)=IBR
   DO 9 L=IND1,IND
   9 IGRAF(L)=IPONT
   IGRAF(IND)=IXIX
   GO TO 30
20 INC=1
   4 DO 6 L=1,101
   6 IGRAF(L)=IBR
   DO 7 L=IND,IND1
   7 IGRAF(L)=IPONT
   IGRAF(IND)=IXIX

```

```

      GO TO 30
21 DO 14 L=1,101
14 IGRAF(L)=IPONT
   IGRAF(101)=IX IX
30 IGRAF(IND1)=IBARRA
   KK=K-1
   WRITE(IOUT,40)KK,X(K),(IGRAF(L),L=1,101)
40 FORMAT(1X,14,1H ,E12.5,1H ,101A1)
   5 CONTINUE
83 RETURN
   END

```

```

      DO 53 I=1,N
      Q(I)=I-N2-1
53  CONTINUE
      XMIN=X(1)
      XMAX=X(1)
      WRITE(IOUT,79)
79  FORMAT(20X,'-----
*-----')
      DO 1 K=2,LX
      IF(X(K)-XMIN)80,2,2
80  XMIN=X(K)
      IF(X(K)-XMAX)1,81,81
81  XMAX=X(K)
      1 CONTINUE
      IF(XMIN-XMAX)82,83,83
82  RANG=XMAX-XMIN
      IF(XMIN.GE.0.)IND1=1
      IF(XMIN.LT.0.)IND1=IFIX(ABS(XMIN*100./RANG+0.5))
      DO 5 K=1,LX
      INC=IFIX((X(K)-XMIN)*100./RANG+0.5)

```

```

SUERCUTINE GRAFT(LX,X)
DIMENSION X(01),IGRAF(101),Y(8192),Q(8192)
DATA IPONT /'-'/
DATA IBARRA / 1H /
DATA IXIX /'*'/
DATA IBR /' '/
IN=8
IOUT=5
N=LX
N2=N/2
CC 50 I=1,N2
Y(I)=X(I+N2)
50 CONTINUE
N2M1=N2+1
CC 51 I=N2M1,N
Y(I)=X(I-N2)
51 CONTINUE
CC 52 I=1,N
X(I)=Y(I)
52 CONTINUE

```

```
      IF(IND) 84,20,84
84  IF(IND-101) 22,21,21
22  IF(IND-IND1)4,3,3
    DO 12 L=1,101
12  IGRAF(L)=IBR
    DO 9 L=IND1,INC
    9  IGRAF(L)=IPONT
      IGRAF(IND)=IXIX
      GO TO 20
20  INC=1
    4  DO 6 L=1,101
    6  IGRAF(L)=IBR
      CC 7 L=IND,IND1
    7  IGRAF(L)=IPONT
      IGRAF(IND)=IXIX
      GO TO 30
21  DO 14 L=1,101
14  IGRAF(L)=IPONT
      IGRAF(101)=IXIX
30  IGRAF(INC1)=IBARRA
```

```

40 WRITE(IOUT,40)Q(K),X(K),(IGRAF(L),L=1,101)
5  FORMAT(1X,I6,1H ,E12.5,1H ,101A1)
83 CONTINUE
   RETURN
   ENC

```

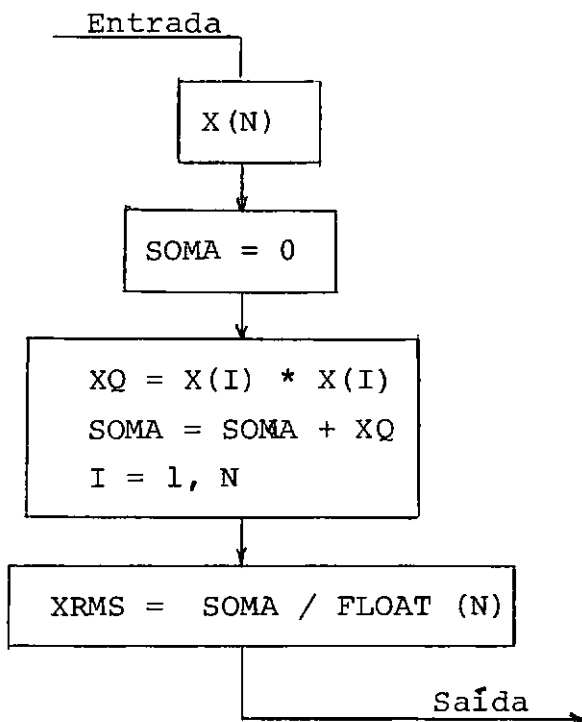
2.3. - SUBROTINA RMS

2.3.1. - FINALIDADE E USO

A subrotina RMS calcula o "Root mean square" de uma função dada. Seus argumentos são: X, N e XRMS.

X é a função em que se deseja calcular a RMS.
N é o número de pontos desta função e XRMS a RMS da função.

2.3.2. - DIAGRAMA DE BLOCO



CCCCC

10

SUBROUTINE RMS(X,N,A)
DIMENSION X(8192),Y(8192)

ESTE PROGRAMA CALCULA A RMS DE UMA FUNCAO X DADA.

SOMA=0.
DO 10 I=1,N
Y(I)=X(I)*X(I)
SOMA=SCMA+Y(I)
CONTINUE
A=SOMA/FLOAT(N)
RETURN
END

```

SCMA=0.0
DO 212 I=1,N
SM=SM+CIP(I)
SCMA=SCMA+DEP(I)
212 CONTINUE
XMI=SM/FLOAT(N)
XME=SCMA/FLOAT(N)
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE SAUT(B,N,M,X,DEP,DIP)
DIMENSION V(80),DIP(8192),DEP(8192),X(8192),Y(8192),XN(8192),
W(8192),XM(8192), A(8192),B(8192),C(8192),R1(8192)
COMPLEX A,C,R1
IN=R
ICUT=5
N2=N/2

```

```

CENTRALISACAO DA FUNCAO
CALCULO DA MEDIA

```

```

SCMA=0.0
DO 100 I=1,N2
SCMA=SCMA+B(I)
CONTINUE
100 XMED=SCMA/FLOAT(N2)
DO 110 I=1,N2
B(I)=B(I)-XMED

```

CCCCC

```

110 CONTINUE
    N2M1=N2+1
    DO 120 I=N2M1,N
    B(I)=0.0
120 CCNTINUE

C
C
C      CALCULO DA TRANSFORMADA DE FOURIER

    DO 130 I=1,N
    AA=B(I)
    A(I)=CMPLX(AA,0.0)
130 CONTINUE
    SIGN=1
    CALL FFTF(A,N,M,SIGN)
    CALL BITREV(A,N)

C
C
C      CALCULO DA FUNCAO DE AUTOCORRELACAO

    DO 140 J=1,N
    C(J)=A(J)*CONJG(A(J))

```

00000000

CCCCCCCC

CALL GRAFT(N,X)

APLICACAO DA JANELA

PI=3.14159

IAK=N/2

AF=PI/FLOAT(IAK)

IK=IAK+1

IK1=IK+1

DO 190 I=1,IK

W(I)=0.5+(0.5*COS((I-1)*AF))

190 CONTINUE

CC 200 I=IK1,N2

W(I)=0.0

200 CCNTINUE

DO 210 I=2,N2

```

C(1)=C(1)*W(1)
C(N-1+2)=C(1)
210 CONTINUE

C
C
C      ESTIMADOR DA DENSIDADE ESPCTRAL

SIGN=1
CALL FFTF(C,N,M,SIGN)
CALL BITREV(C,N)
DO 211 I=1,N
CP=REAL(C(I))
DIP(I)=CP
DEP(I)=ALOG10(CP)
211 CONTINUE

C
C
C      CENTRALIZACAO DA DENSIDADE ESPECTRAL DE POTENCIA

SM=0.0

```

2.5. - SUBROTINA AEMED - LISTAGEM

```

DIMENSION L(8192) , B(8192) , XI(1024,20) , A(8192) , C(8192) ,
DEP(8192)
DIMENSION V(80)
COMPLEX A , C
IN=8
IOUT=5

```

```

*****
JOAC B. E. SERRAO   ---   COPPE / UFRJ   ---
PROGRAMA DE ENGENHARIA MECANICA   ---   1975
PROGRAMA   ---   AEMED   ---
*****

```

CCCCCCCCCCCC

ESTE PROGRAMA CALCULA A DENSIDADE ESPECTRAL DE POTENCIA UTILIZANDO
 PROCESSO DE OTIMIZACAO DO ESTIMADOR PELA DIVISAO DO SINAL EM FAIXAS.
 CALCULA O AUTOESPECTRO DE CADA UMA DESTAS FAIXAS, COMPUTANDO
 EM SEGUIDA A MEDIA DESTES ESTIMADORES.
 O PROGRAMA UTILIZA AS SEGUINTE SUBROTINAS BITREV, FFTF, GRAPH.

```

N  REPRESENTA O NUMERO GLOBAL DE DADOS
M  REPRESENTA O NUMERO DE FAIXAS
IK REPRESENTA O NUMERO DE DADOS EM CADA FAIXA
JJ REPRESENTA O ACRESIMO NO NUMERO DE DADOS PARA O INICIO
   DA NOVA FAIXA
IE DEVE SER TAL QUE -- IK=2**IE --

```

C
C
C
C

NL REPRESENTA O TIPO DE LEITURA

```

      REAC(IN,1) (V(I),I=1,80)
1    FCFORMAT(80A1)
      WRITE(IOUT,30)
30   FORMAT(1H1)
      WRITE(IOUT,2) (V(I),I=1,80)
2    FORMAT(//////////,10X,80A1)
51   REAC(IN,280) N,M,IK,JJ,IE,NL
280  FORMAT(6I4)
      WRITE(IOUT,30)
      WRITE(IOUT,281) N,M,IK,JJ,IE,NL
281  FORMAT(////,10X,'N =',15,10X,'M =',15,10X,'IK=',15,10X,'JJ=',15,10
X,'IE=',15,10X,'NL=',15)

```

C
C
C

GC TC (72,73,74),NL

III

III

```
DO 320 I=1,M
IF(I-1) 340,340,350
340 INI=1
   IFI=IK
   GO TO 360
350 INI=INI+JJ
   IFI=IFI+JJ
360 DO 370 J=INI,IFI
   LW=J-(JJ*(I-1))
   XI(LW,I)=B(J)
370 CONTINUE
DO 400 LW=1,IK
   AA=XI(LW,I)
   A(LW)=CMPLX(AA,0.0)
400 CONTINUE
SIGN=1
CALL FFTTF(A,IK,IE,SIGN)
CALL BITREV(A,IK)
DO 410 LL=1,IK
C(LL)=(FLOAT( IK)/6.2831)*A(LL)*CONJG(A(LL))
```

```

      XI(LL,I)=REAL(C(LL))
410  CONTINUE
320  CONTINUE
      DO 440 LW=1,IK
          SOMA=0.0
          DO 450 I=1,M
              SOMA=SOMA+XI(LW,I)
450  CONTINUE
          DEP(LW)=SOMA/FLOAT(M)
440  CONTINUE

      GRAFICC  DA  DENSIDADE  ESPECTRAL

      P/  LISTAR  A  MEDIA  DOS  ESTIMADORES  DA  DENS.  EPECT.  DE  POT.  USE

      WRITE(IOUT,30)
      WRITE(IOUT,470)
C 470  FORMAT(////,10X,'MEDIA  DOS  ESTIMADORES  DE  DENSIDADE,ESPECTRAL'

```

C
C
C
C

,//)
CALL GRAPH(IK,DEP)

WRITE(IOUT,30)
WRITE(IOUT,470)

470 FORMAT(////,10X,'MEDIA DOS ESTIMADORES DE DENSIDADE ESPECTRAL'

,//)
CALL GRAPH(IK,DEP)

C
C

CALL EXIT
ENC

$$N_2 = N / 2$$

C
C
C
C
C

ALINHAMENTO DA 2A. SERIE DE DADOS COM A 1A. SERIE

521 B(1)=Y(1)
CC 522 I=2,N2
B(1)=Y(I-1)+Y(I)
522 CONTINUE
CC 523 I=1,N2
Y(1)=B(I)/2.
523 CONTINUE

C
C
C
C
C
C
C
C

P/ LISTAGEM DOS DADOS DA 1A. SERIE USE

WRITE(IOUT,30)
WRITE(IOUT,620)
620 FORMAT(////,10X,'GRAFICO DA 1A SERIE DE DADOS',//)
CALL GRAPH(N2,X)

CCCCCCCC

```

P/ LISTAGEM DOS DADOS DA 2A. SERIE USE
WRITE(IOUT,30)
WRITE(IOUT,630)
630  FORMAT(////,10X,'GRAFICO DA 2A SERIE DE DADOS',/)
      CALL GRAPH(N2,Y)

      SX=0.
      SY=0.
      DO 640 I=1,N2
      SX=SX+X(I)
      SY=SY+Y(I)
640  CONTINUE
      XMX=SX/FLOAT(N2)
      XMY=SY/FLOAT(N2)
      DO 650 I=1,N2
      X(I)=X(I)-XMX

```

C
C
C

```
Y(I)=Y(I)-XMY
650 CCNTINUE
DO 660 I=1,N2
XX(I)=CMPLX(X(I),0.0)
YY(I)=CMPLX(Y(I),0.0)
660 CONTINUE
N2M1=N2+1
DO 670 I=N2M1,N
XX(I)=CMPLX(0.0,0.0)
YY(I)=CMPLX(0.0,0.0)
670 CONTINUE
SIGN=1
CALL FFTF (XX,N,M,SIGN)
CALL BITREV(XX,N)
CALL FFTF (YY,N,M,SIGN)
CALL BITREV(YY,N)

CALCULO DA CROSSCORRELAÇÃO CXY
DO 680 I=1,N
```

```

680 CCR(I)=XX(I)*CONJG(YY(I))
    CONTINUE
    SIGN=-1
    CALL FFTTF(CCR,N,M,SIGN)
    CALL BITREV(CCR,N)
    DO 700 I=1,N
    XN(I)=REAL(CCR(I))
700 CONTINUE

```

CCCCCCCC

```

    P/ LISTAR A CROSSCORRELACAO USE
    WRITE(IOUT,30)
    WRITE(IOUT,710)
710 FORMAT(////,10X,'GRAFICO DA CROSSCORRELACAO CXY')
    CALL GRAFT(N,XN)

```

APLICACAO DA JANELA ESPECTRAL

C

```

PI=3.14159
IAK=N/3
AF=PI/FLOAT(IAK)
IK=IAK+1
IK1=IK+1
DO 720 I=1,IK
W(I)=0.5+(0.5*COS((I-1)*AF))
720 CONTINUE
DO 730 I=IK1,N2
W(I)=0.
730 CONTINUE
DO 740 I=2,N2
CCR(I)=CCR(I)*W(I)
CCR(N-I+2)=CCR(I)
740 CONTINUE

```

C
C
C

ESTIMADOR DA DENSIDADE ESPECTRAL

CCCCCCCC

```

SIGN=1
CALL FFTF(CCR,N,M,SIGN)
CALL BITREV(CCR,N)
CC 750 I=1,N
XM(I)=CABS(CCR(I))
750 CONTINUE

P/ LISTAR O CROSSESPECTRO USE

WRITE(IOUT,30)
WRITE(IOUT,760)
760 FORMAT(////,10X,'ESTIMADOR DA DENSIDADE ESPECTRAL',///,10X,
3'MODULC',/)
CALL GRAPH(N2,XM)

RETURN
END

```

2. 6. - PROGRAMA CROSS

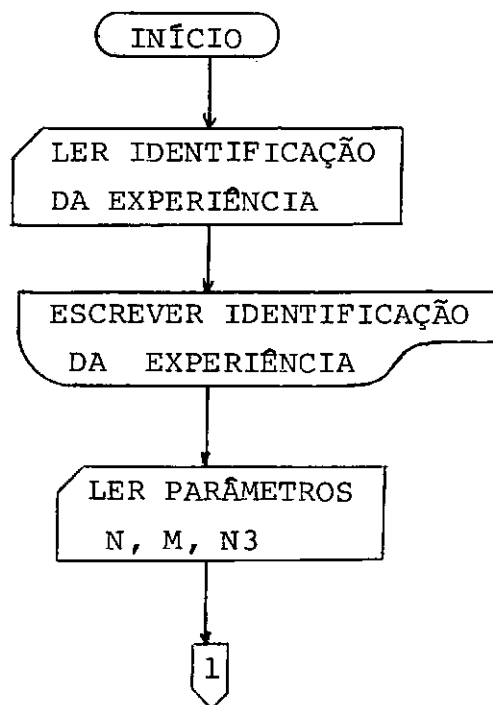
2.6.1.. - FINALIDADE E USO

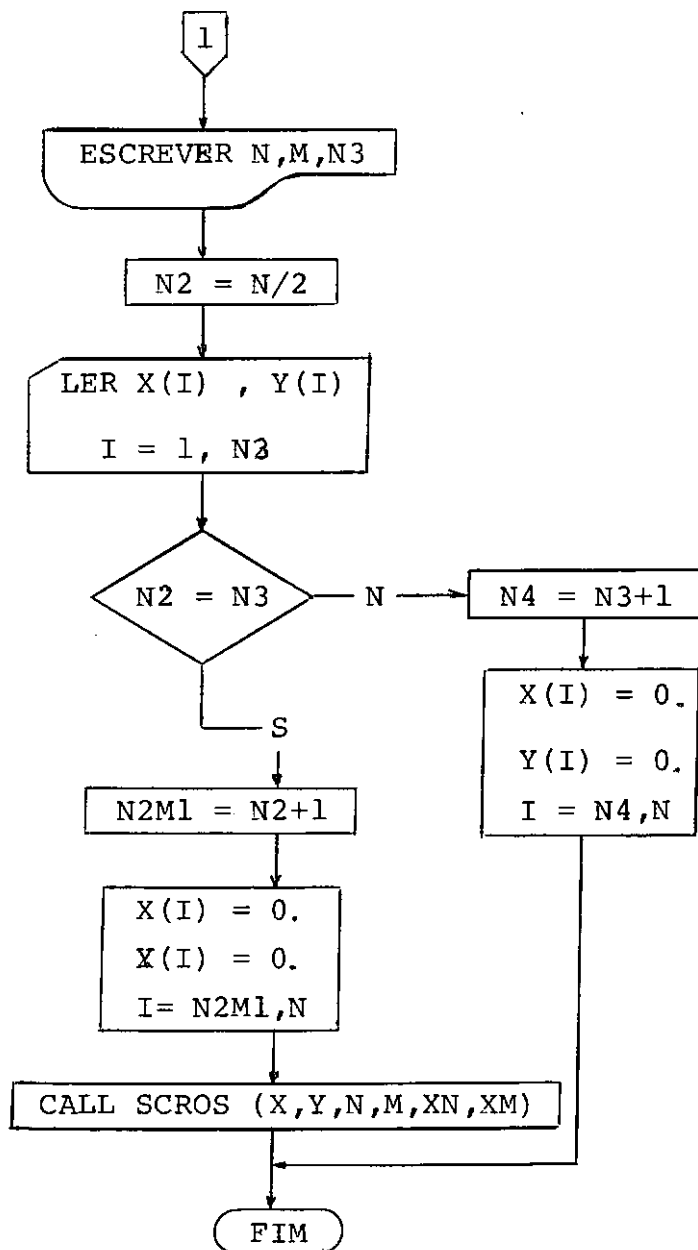
A finalidade do programa CROSS é apenas a utilização da subrotina SCROS.

Entrames com os dados da seguinte forma:

- primeiro o cartão de identificação da experiência;
- após isto com o cartão dos parâmetros N, M, N3 parâmetros estes, iguais aos do programa TRANSP;
- em seguida lemos $X(t)$ e $Y(t)$.

IV.9.2. - DIAGRAMA DE BLOCO DO PROGRAMA CROSS






```
DIMENSION X(8192),Y(8192),XX(8192),YY(8192),CCR(8192),XN(8192),  
W(8192),XM(8192)  
DIMENSION V(80)  
COMPLEX XX,YY,CCR  
IN=8  
IOUT=5
```

```
*****  
JOAO B. E. SERRAO --- COPPE / UFRJ  
PROGRAMA DE ENGENHARIA MECANICA --- 1975  
PROGRAMA --- CROSS  
*****
```

```
ESTA PARTE DO PROGRAMA CALCULA A CROSSCORRELACAO E CROSS-
```

00000000000000000000000000000000

ESPECTRO

ESTE PROGRAMA UTILIZA AS SEGUINTE SUBROTINAS BITRV,FFTTF,GRAPH,
GRAFT E SCROS.

N REPRESENTA O NUMERO DE PONTOS UTILIZADOS PARA O CALCULO.

M NUMERO TAL QUE --- $N = M \cdot 2$ ---

N3 REPRESENTA O NUMERO DE DADOS A LER.

N3 E MENOR OU IQUAL A N/2.

```

      REAC(IN,I) (V(I),I=1,80)
1  FORMAT(80A1)

```

```
WRITE(IOUT,2) (V(I),I=1,80)
2 FORMAT(//////////,10X,80A1)
```

```
      WRITE(IOUT,30)
30  FCRMAT(1F1)
52  READ(IN,500) N,M ,N3
500  FORMAT(3I4)
      WRITE(IOUT,30)
      WRITE(IOUT,501) N,M,N3
501  FCRMAT(////,10X,'N=',I5,15X,'M=',I5,15X,'N3=',I5)
      N2=N/2
      READ(IN,510)(X(I),Y(I),I=1,N3)
510  FCRMAT(16I5)
      IF(N2-N3)521,521,511
511  N4=N3+1
      DO 520 I=N4,N
          X(I)=0.
          Y(I)=0.
520  CONTINUE
      GO TO 530
521  N5=N2+1
      DO 522 I=N5,N
          X(I)=0.
```

```

Y(I)=0.
522 CONTINUE
530 CALL SCROS(X,Y,N,M,XN,XM)
CALL EXIT
END

```

```

DIMENSION V(80),LE(8192),LS(8192),L(8192),A(8192),B(8192),C(8192)
DIMENSION R1(8192),X(8192),Y(8192),W(8192),DIP(8192),DEP(8192)
DIMENSION DIF(8192,6), CPST(8192)
COMPLEX A,C,R1
IN=8
IOUT=5

```

```

*****
COPPE / UFRJ   ---  PROGRAMA DE ENG. MECANICA
JCAC BOSCO ERTAL SERRAO  ---  JULHO DE 1975
PROGRAMA   ---  CEPST   ---
*****

```

```

N REPRESENTA O NUMERO DE PONTOS USADOS

```

CCCCCCCCCCCC

CC

```

N      DEVE SER TAL QUE  --  N=2**M  --
N3     REPRESENTA O NO. DE DADOS OBTIDOS NA DIGITALIZACAO
DIP    REPRESENTA A DENSIDADE ESPECTRAL DE POTENCIA
DEP    REPRESENTA O LOG. DECIMAL DA DENS. ESPECT. DE POTENCIA

IDENTIFICACAO  DE  EXPERIENCIA

      READ(IN,1) (V(I),I=1,80)
1     FORMAT(80A1)
      WRITE(IOUT,90)
90    FORMAT(1H1)
      WRITE(IOUT,2) (V(I),I=1,80)
2     FORMAT(////,10X,80A1)
```

CCCCC

10 READ(IN,10)N,M,N3
FORMAT(3I4)

IMPRESSAO DOS PARAMETROS

20 WRITE(IOUT,20) N,M,N3
FORMAT(//////////,10X,'N =',I6,10X,'M =',I4,10X,'N3=',I6)
30 READ(IN,30) IFAT1,IFAT2
FORMAT(2I2)

N2=N/2
40 READ(IN,40) (LE(I),LS(I),I=1,N3)
FORMAT(16I5)
WRITE(IOUT,90)
WRITE(IOUT,51) IFAT1,IFAT2

51 FORMAT(//////////,10X,'A. CONSTANTE QUE MULTIPLICA O SINAL DE
ENTRADA E IGUAL A ',I2,///,10X,'A. CONSTANTE QUE MULTIPLI
CA O SINAL DE SAIDA E IGUAL A ',I2)
DO 60 I=1,N3

۷۷۷

P/ LISTAR OS DADOS USAR O SEGUINTE CONJUNTO DE CARTOES
WRITE(IOUT,90)

[illegible]

CCCCCCCCCCCC

```
220 FORMAT(////,10X,'GRAFICO DA DENSIDADE ESPECTRAL DE POTENCIA',//)  
CALL GRAPH(N2,CIP)
```

```
P/ LISTAR O LOG. DA DENS. ESPEC. DE POT. USE
```

```
WRITE(IOUT,90)
```

```
WRITE(IOUT,230)
```

```
230 FORMAT(////,10X,'GRAFICO DO LOGARITMO DA DENSIDADE ESPECTRAL  
CNTRA FREQUENCIA',//)  
CALL GRAPH(N2,DEP)
```

```
CALCULE DO SQUEPTRUM
```

```
240 DO 250 I=1,N  
C(I)=CMPLX(DEP(I),0.0)
```

```

250 CONTINUE
    SIGN=1
    CALL FETTF(C,N,M,SIGN)
    CALL BITREV(C,N)
    DO 260 I=1,N
        CPST(I)=CABS(C(I))
260 CONTINUE
C
C      FILTRAGEM      DO      SQUEP TRUM
C
    N1=N+1
    CPST(N1)=0.0
    DO 300 I=1,N
        Y(I)=CPST(I)+CPST(I+1)
300 CONTINUE
    DO 301 I=1,N
        CPST(I)=Y(I)/2.
301 CONTINUE
C
C

```

```
C      GRAFICO  DO  SQUEPTRUM
CCCCC
C      P/  MELHOR REPRESENTACAO DO SQUEPTRUM FAREMOS
259 DO 261 I=1,30
    CPST(I)=0.
261 CONTINUE
C
C      WRITE(IOUT,90)
    WRITE(IOUT,270)
270 FORMAT(////,10X,'GRAFICO  DO  SQUEPTRUM',//)
    CALL GRAPH(N2,CPST)
    CALL EXIT
    END
```

```
DIMENSION V(80),W(8192),L1(8192),L2(8192),B1(8192),B2(8192)
DIMENSION DEP(8192),X(8192),Y1(8192),Y2(8192),HP(8192)
IDOUT=5
IN=8
```

```
*****
JOAC B. E. SERRAO --- COPPE / UFRJ
PROGRAMA DE ENGENHARIA MECANICA --- 1975
PROGRAMA --- TRANSP ---
*****
```

```
ESTE PROGRAMA CALCULA A TRANSPARENCIA DE PAREDE
E UTILIZA AS SUBROTINAS GRAPH, GRAFT, FFTTF, BITREV E SAUT.
```

CCCCCCCCCCCC

Y1 AUTOESPECTRO DO SINAL COM PAREDE

Y2 AUTOCESPECTRO DO SINAL SEM PAREDE

HP FUNCAO DE TRANSFERENCIA DA PAREDE

P/ INICIAR O PROCESSAMENTO DA 2A. SERIE DE DADOS USE LC=9999

IDENTIFICACAO DA EXPERIENCIA

```
      READ(IN,1) (V(I),I=1,80)
1     FORMAT(80A1)
      WRITE(1OUT,30)
30    FCRMAT(1H1)
      WRITE(1OUT,2) (V(I),I=1,80)
2     FORMAT(//////////,10X,80A1)
      READ(IN,10) N,M,N3
```

```
10 FORMAT(3I4)
   WRITE(IOUT,20) N,M,N3
20  FORMAT(/,/,/,/,/,/,/,/,10X,'N=',I5,10X,'M=',I4,10X,'N3=',I5)
   READ(IN,40) (L1(I),I=1,N3)
40  FORMAT(8(5X,I5))
50  READ(IN,60,END=70) LC
60  FORMAT(I5)
C *****
   IF(LC-9999) 50,50,70
C *****
70  WRITE(IOUT,80)
80  FORMAT(/,/,/,/,/,/,/,/,10X,'NAO FOI ENCONTRADO O INICIO DA 2A. SERIE')
   GO TO 270
90  READ(IN,100) (L2(I),I=1,N3)
100 FCRMAT(8(5X,I5))
    N2=N/2
    IF(N2-N3) 120,160,140
120 WRITE(IOUT,130)
130 FORMAT(/,/,/,/,/,/,/,/,10X,'O PARAMETRO N3 DEVE ESTAR ERRADO --- VE
    FIQUE')
```

```

GO TC 270
140 N3M1=N3+1
DO 150 I=N3M1,N
L1(I)=0.
L2(I)=0.
150 CONTINUE
GO TC 180
160 N2M1=N2+1
DO 170 I=N2M1,N
L1(I)=0.
L2(I)=0.
170 CCNTINUE
180 DO 190 I=1,N
B1(I)=FLOAT(L1(I))
B2(I)=FLOAT(L2(I))
190 CONTINUE
CALL SAUT(B1,N,M,X,DEP,Y1)
CALL SAUT(B2,N,M,X,DEP,Y2)
DO 200 I=1,N2
IF(Y2(I)) 210,230,250

```



```
210 WRITE(IOUT,220) I
220 FORMAT(/,10X,'Y2(',I4,') E NEGATIVO')
    HP(I)=-2.
    GO TO 200
230 WRITE(IOUT,240) I
240 FORMAT(/,10X,'Y2(',I4,') = 0.0')
    HP(I)=-1.
    GO TO 200
250 HP(I)=Y1(I)/Y2(I)
200 CONTINUE
    WRITE(IOUT,30)
    WRITE(IOUT,260)
260 FORMAT(///// ,10X,'GRAFICO DA FUNCAO DE TRANSFERENCIA DA PAREDE',//
    //)
    CALL GRAPH(N2,HP)
270 CALL EXIT
END
```

```

DIMENSION V(80),DIP(8192),DEP(8192)
DIMENSION X(8192),Y(8192),XX(8192),YY(8192),CCR(8192),XN(8192),
W(8192),XM(8192), A(8192),R(8192),C(8192),R1(8192)
DIMENSION P1(8192),S44(8192),SCT(8192),S33(8192),SQ43(8192),
XP(4,8192),XXP(8192),BP(8192),YP(8192),S43(8192)
COMPLEX A,C,R1
COMPLEX XX,YY,CCR
IN=8
IOUT=5

```

CCCCCCCCCCCC

```

JOAC B. E. SERRAO --- COPPE / UFRJ
PROGRAMA DE ENGENHARIA MECANICA --- 1975
PROGRAMA COPEN.

```

CCCC

```

      READ(IN,1) (V(I),I=1,80)
1  FORMAT(80A1)
      WRITE(IOUT,70)
70  FORMAT(1H1)
      WRITE(IOUT,2) (V(I),I=1,80)
2  FORMAT(//////////,10X,80A1)
      READ(IN,3) N,M,F
3  FORMAT(2I4,I5)
      WRITE(IOUT,4) N,M,F
4  FORMAT(//////////,10X,'N =',I5,10X,'M =',I5,10X,'F =',I6,' HZ')
      N2=N/2
      DO 20 I=1,3,2
        J=I+1
        READ(IN,10)(XP(I,K),XP(J,K),K=1,N2)
10  FORMAT(16I5)

```

```

20 CONTINUE
   DO 40 I=1,2
   CC 30 J=1,N2
   XXP(J)=XP(I,J)
30 CONTINUE
   CALL RMS(XXP,N2,AF)
   BP(I)=AF
40 CONTINUE
   FATOR=BP(1)/BP(2)
   FATQ=FATOR*FATOR
   CC 41 I=1,N2
   BP(I)=XP(3,I)
41 CONTINUE
   CALL SAUT(BP,N,M,X,DEP,S33)
   DO 42 I=1,N2
   X(I)=XP(4,I)
   Y(I)=XP(3,I)
42 CONTINUE
   CALL SCROS(X,Y,N,M,XN,S43)
   DO 50 I=1,N

```

```

SQ43(I)=S43(I)*S43(I)
50 CONTINUE
DO 60 I=1,N
P1(I)=SQ43(I)/(FATQ*S33(I))
S44(I)=ALOG10(P1(I))
60 CONTINUE
CF=FLOAT(F)/FLOAT(N)
WRITE(IOUT,70)
WRITE(IOUT,71) DF
71 FORMAT(//////////,10X,'DF REPRESENTA O INCREMENTO DE FREQUENCIA D
E PONTO P/ PONTO NO GRAFICO DE SAIDA.',//,10X,'CALCULA-SE A FREQU
ENCIA NO GRAFICO ABAIXO MULTIPLICANDO-SE O NUMERO DO PONTO POR',
F10.3,' HZ')
WRITE(IOUT,80)
80 FORMAT(//////////,10X,'GRAFICO DO LOG. DA POTENCIA TRANSMITIDA PELA
FCNTE',//)
CALL GRAPH(N2,S44)
CALL EXIT
END

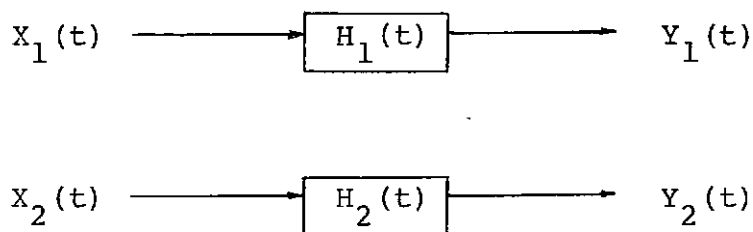
```

APÊNDICE 3

ESTUDO DA CONTRIBUIÇÃO SONORA DE UMA FONTE NO RUÍDO TOTAL
DE UM DETERMINADO PONTO.

3.1.- DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

Seja um modelo definido pela figura abaixo:



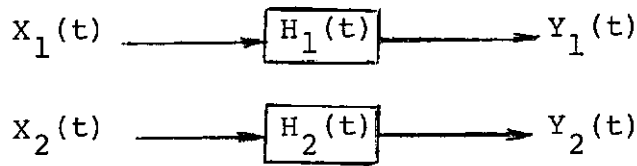
Temos a seguinte relação:

$$S_{Y_1 Y_2}(f) = h_1(f) \cdot h_2^*(f) S_{X_1 X_2}(f)$$

onde

$h(f) = F \{H(t)\}$ e, (*) significa o complexo conjugado da função.

Estudaremos o caso de 2 fontes não correlatas entre si, por exemplo 2 motores de características diferentes.



$$Y_1(t) = X_1(t) * H_1(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X_1(t_1) H_1(t-t_1) dt_1$$

$$Y_2(t) = X_2(t) * H_2(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X_2(t_2) H_2(t-t_2) dt_2$$

$$C_{X_1 X_2}(T) = E \{X_1(t) \cdot X_2(t-T)\} \quad (1)$$

$$C_{Y_1 Y_2}(T) = E \{Y_1(t) \cdot Y_2(t-T)\}$$

$$Y_1(t) \cdot Y_2(t-T) = \int_{-\infty}^{\infty} X_1(t_1) H_1(t-t_1) dt_1 \int_{-\infty}^{\infty} X_2(t_2) H_2(t-T-t_2) dt_2$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} dt_1 \int_{-\infty}^{\infty} X_1(t_1) X_2(t_2) H_1(t-t_1) H_2(t-T-t_2) dt_2$$

$$C_{Y_1 Y_2}(T) = \int_{-\infty}^{\infty} dt_1 \int_{-\infty}^{\infty} E\{X_1(t_1) X_2(t_2)\} H_1(t-t_1) H_2(t-T-t_2) dt_2$$

Devido a estacionalidade do processo estocástico

temos:

$$E\{X_1(t_1) X_2(t_2)\} = E\{X_1(t+t_1) X_2(t+t_2)\}$$

$$E\{X_1(t_1) X_2(t_1-(t_1-t_2))\} = C_{X_1 X_2}(t_1-t_2) \text{ vide equação (1)}$$

então:

$$C_{Y_1 Y_2}(T) = \int_{-\infty}^{\infty} dt_1 \int_{-\infty}^{\infty} C_{X_1 X_2}(t_1-t_2) H_1(t-t_2) H_2(t-T-t_2) dt_2$$

$$S_{Y_1 Y_2}(f) = F\{C_{Y_1 Y_2}(T)\} = \int_{-\infty}^{\infty} C_{Y_1 Y_2}(T) e^{-2i\pi f T} dT$$

$$S_{Y_1 Y_2}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} dt_1 \int_{-\infty}^{\infty} dt_2 \int_{-\infty}^{\infty} C_{X_1 X_2}(t_1-t_2) H_1(t-t_1) H_2(t-T-t_2) e^{-2i\pi f T} dT$$

$$e^{-2i\pi f T} = e^{-2i\pi f((t_1-t_2) + (t-t_1)-(t-T-t_2))}$$

$$S_{Y_1 Y_2}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} H_1(t-t_1) e^{-2i\pi f(t-t_1)} d(t-t_1) \cdot \int_{-\infty}^{\infty} H_2(t-T-t_2) e^{2i\pi f(t-T-t_2)} \cdot d(t-t_2) \cdot$$

$$\cdot \int_{-\infty}^{\infty} C_{X_1 X_2}(t_1-t_2) e^{-2i\pi f(t_1-t_2)} d(t_1-t_2)$$

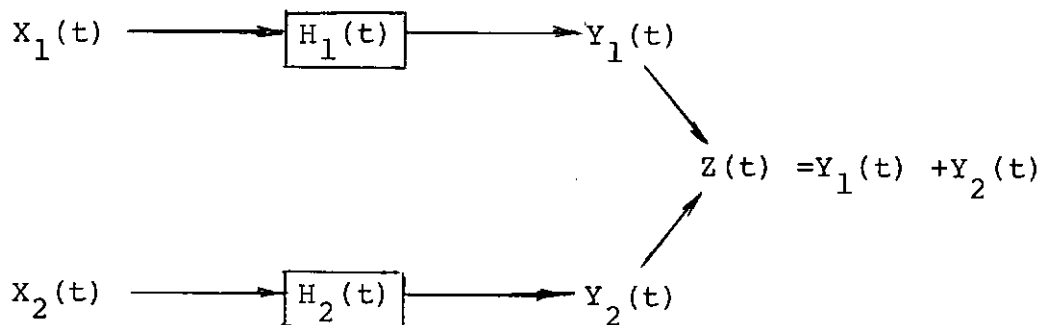
$$S_{Y_1 Y_2}(f) = h_1(f) h_2^*(-f) S_{X_1 X_2}(f)$$

$$h(-f) = h_1^*(f) \rightarrow \text{complexo conjugado}$$

logo

$$S_{Y_1 Y_2}(f) = h_1(f) h_2^*(f) S_{X_1 X_2}(f)$$

Neste caso utilizamos o seguinte esquema:



$$S_{Y_1 Y_1}(f) = \left| h_1(f) \right|^2 S_{X_1 X_1}(f)$$

Temos que:

$$S_{ZX_1}(f) = h_1(f) S_{X_1X_1}(f) + h_2(f) S_{X_2X_1}(f)$$

Como as funções $X_1(t)$ e $X_2(t)$ não são correlatas
então:

$$S_{X_2X_1}(f) = 0$$

Logo, podemos dizer que:

$$S_{ZX_1}(f) = h_1(f) S_{X_1X_1}(f)$$

Por conseguinte:

$$\begin{aligned} S_{Y_1Y_1}(f) &= |h_1(f)|^2 S_{X_1X_1}(f) \\ &= \frac{|h_1(f)|^2 S_{ZX_1}(f)}{h_1(f)} \\ &= \frac{h_1(f) S_{ZX_1}(f) \cdot S_{ZX_1}(f)}{h_1(f) S_{X_1X_1}(f)} \end{aligned}$$

logo,

$$S_{Y_1Y_1}(f) = \frac{|S_{ZX_1}(f)|^2}{S_{X_1X_1}(f)}$$

Se $S_{Y_1Y_1}(f)$ é o espectro de potência do sinal
transmitido pela fonte 1 no ponto de recepção, logo é também a

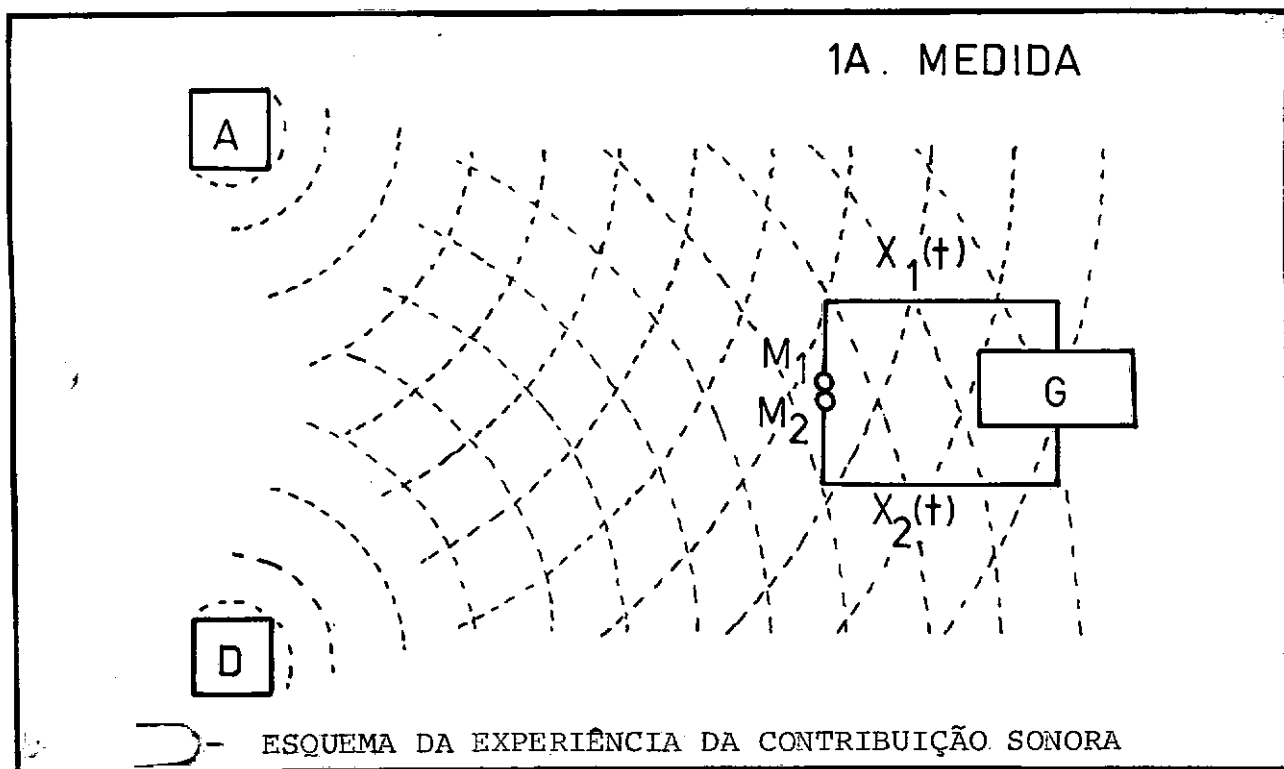
contribuição sonora da fonte 1 no ponto de medição do ruído total. Este raciocínio vale para todas as outras fontes.

Deste modo, determinamos a contribuição sonora de cada fonte no ruído ambiente, em determinado ponto.

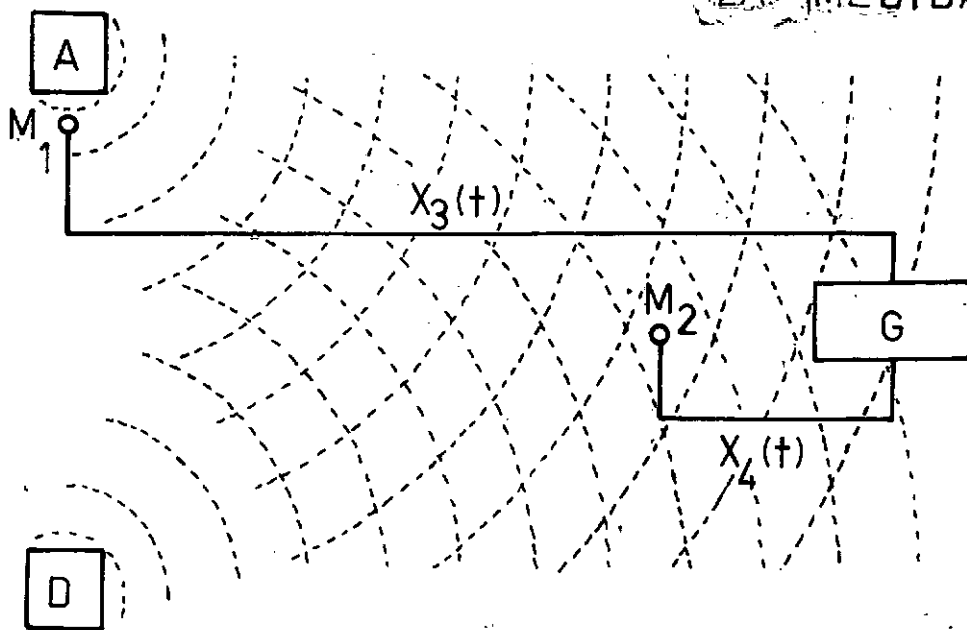
4.3.2.- A EXPERIÊNCIA

Foi realizada uma experiência para medir a contribuição das 2 fontes no nível de ruído em um ponto determinado de uma sala de laboratório.

As 2 fontes eram: um aparelho de ar condicionado e um desumidificador. Realizaram-se 3 medidas segundo o esquema abaixo:

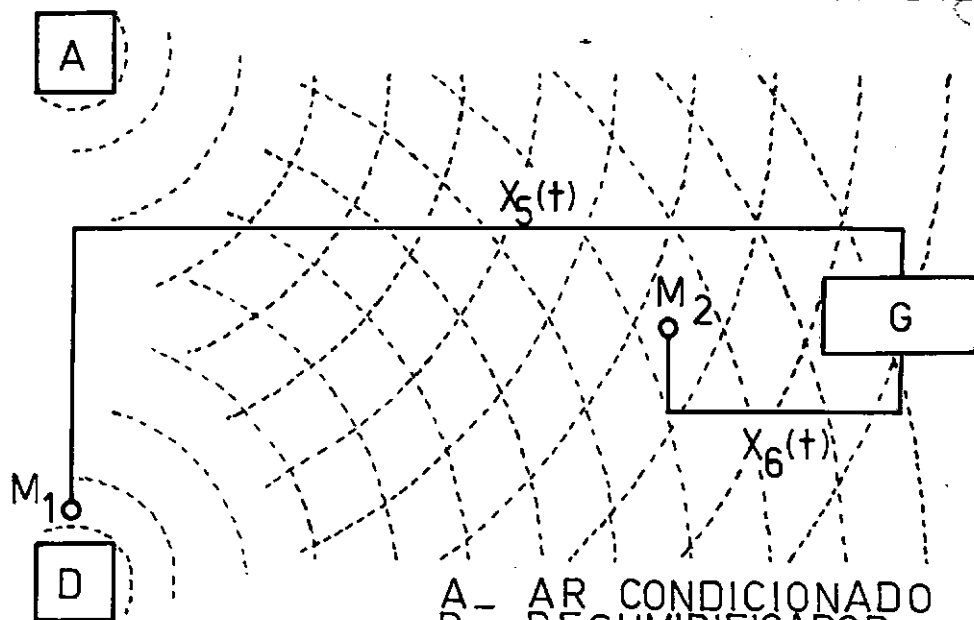


2A. MEDIDA



EXPERIÊNCIA DA CONTRIBUIÇÃO SONORA

3A. MEDIDA



A - AR CONDICIONADO
 D - DESUMIDIFICADOR
 G - GRAVADOR
 M - MICROFONE

EXPERIÊNCIA DA CONTRIBUIÇÃO SONORA

Fizemos a primeira medida porque havia uma diferença de ganho dos microfones (a). Esta diferença foi calculada tomando-se a raiz média quadrática de $X_1(t)$ e dividindo-se pela raiz média quadrática de $X_2(t)$.

As outras medidas subsequentes serviram para medir a contribuição de cada fonte. Foi introduzida uma atenuação de 10 dB nos sinais $X_3(t)$ e $X_5(t)$.

Com todos sinais gravados num gravador de 2 canais, entramos com estes sinais no PDP-12 obtendo os dados em cartões. A frequência máxima de digitalização foi de 20KHz, utilizando um filtro passa-baixa de 5KHz em cada sinal.

Entramos com os dados da primeira medida junto com os da segunda, no programa COPEN e obtivemos a contribuição do ar condicionado. Idem com os dados da primeira medida e da terceira e obtivemos os dados da contribuição do desumidificador no ruído ambiente.

Nas páginas subsequentes são apresentados os resultados retirados do computador.

EXPERIÊNCIA DA CONTRIBUIÇÃO SONORA - DESUMIDIFICADOR

N=1024 M=10 F=20000HZ

DF REPRESENTA O INCREMENTO DE FREQUÊNCIA DE PONTO P/ PONTO NO GRÁFICO DE SAÍDA

CALCULA-SE A FREQUÊNCIA NO GRÁFICO ABAIXO MULTIPLICANDO-SE O Nº DE PONTOS POR 19.531 HZ

GRÁFICO DO LOGARITMO DA POTÊNCIA TRANSMITIDA PELA FONTE

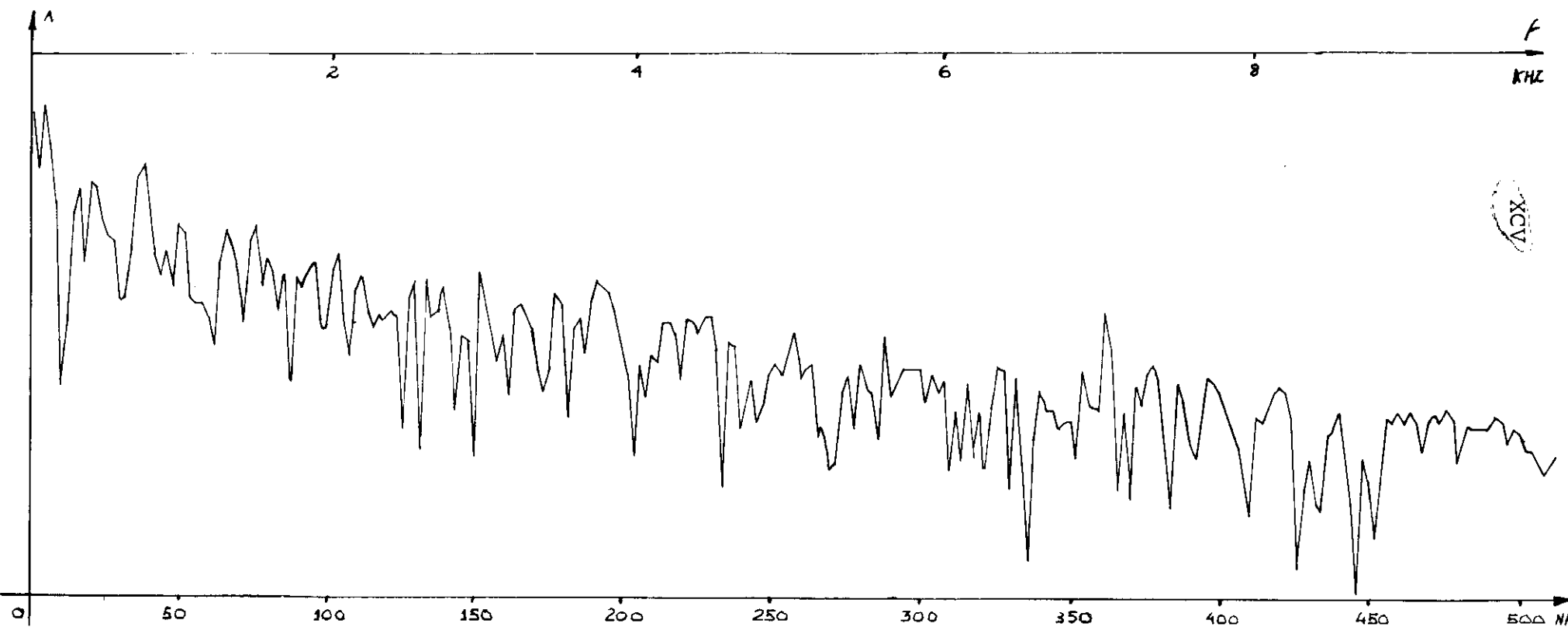


GRÁFICO DA CONTRIBUIÇÃO SONORA DO DESUMIDIFICADOR

EXPERIÊNCIA DA CONTRIBUIÇÃO SONORA — AR CONDICIONADO

$N=1024$ $M=10$ $F=20000\text{ Hz}$

DF REPRESENTA O INCREMENTO DE FREQUÊNCIA DE PONTO P/ PONTO NO GRÁFICO DE SAÍDA

CALCULA-SE A FREQUÊNCIA NO GRÁFICO ABAIXO MULTIPLICANDO-SE O Nº DE PONTOS POR 19.531 Hz

GRÁFICO DA POTÊNCIA TRANSMITIDA PELA FONTE

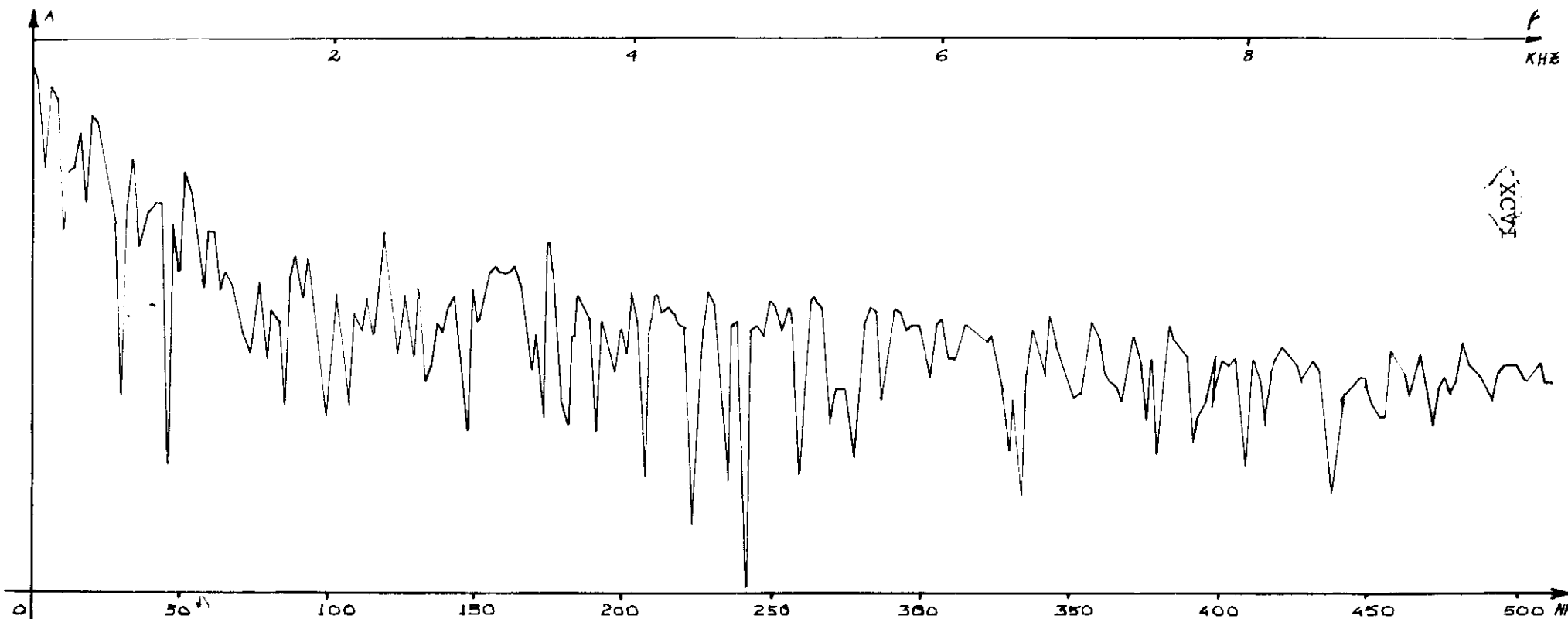


GRÁFICO DA CONTRIBUIÇÃO SONORA DO AR CONDICIONADO

3.3. - VERIFICAÇÕES DAS HIPÓTESES ASSUMIDAS NA EXPERIÊNCIA

FUNÇÕES DE COERÊNCIA

Um dos métodos para verificar que duas funções aleatórias são independentes é a utilização de funções de coerência.

Seja $X(t)$ e $Y(t)$ duas funções aleatórias, definimos como função de coerência a seguinte expressão:

$$CR_{xy}^2(f) = \frac{|S_{xy}(f)|^2}{S_x(f) S_y(f)}$$

Propriedades das funções de coerência:

1 - Como $|S_{xy}(f)|^2 \leq S_x(f) S_y(f)$ então

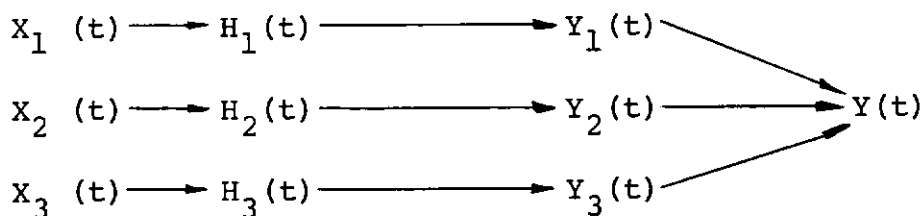
$$0 \leq CR_{xy}^2(f) \leq 1$$

2 - A função de coerência de dois sinais aleatórios é conservada quando os sinais são filtrados linearmente.

3 - A função de coerência entre a entrada e a saída de um sistema linear é igual a 1. No caso que a função seja diferente de 1, o sistema poderá ser não linear ou um outro sinal está presente na saída e que não tem relação com a entrada.

Como podemos ver a função de coerência mostra-nos se duas funções $X(t)$ e $Y(t)$ são correlatas ou não entre si.

Estudemos então um caso onde temos tres fontes e num mesmo ponto medimos os sinais emitidos pelas tres fontes, porém, cada sinal passa por caminhos diferentes:



Caso exista correlação entre estes sinais temos que

$$C_Y(T) = E \{ y(t) y(t-T) \}$$

$$C_Y(T) = E \{ (y_1(t) + y_2(t) + y_3(t)) (y_1(t-T) + y_2(t-T) + y_3(t-T)) \}$$

$$\begin{aligned}
 S_Y(f) = & S_{Y_1}(f) + S_{Y_2}(f) + S_{Y_3}(f) + \\
 & + S_{Y_1 Y_2}(f) + S_{Y_2 Y_1}(f) + \\
 & + S_{Y_1 Y_3}(f) + S_{Y_3 Y_1}(f) + \\
 & + S_{Y_2 Y_3}(f) + S_{Y_3 Y_2}(f)
 \end{aligned}$$

As funções de correlação cruzada na equação acima são difíceis de serem computadas devido ao fato de que na prática quando estamos medindo os sinais emitidos pelas fontes, na maioria dos casos, é difícil parar todos os equipamentos e deixar apenas um funcionando de cada vez.

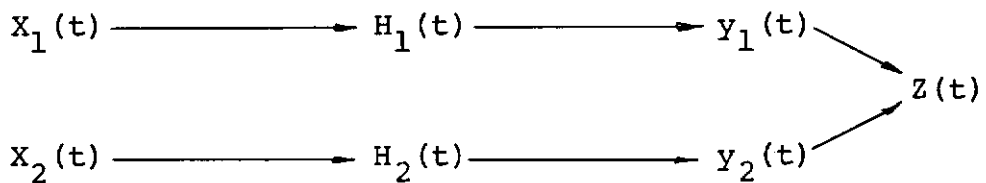
Caso as funções $y_1(t)$, $y_2(t)$ e $y_3(t)$ não serem correlatas entre si, a equação acima fica reduzida a:

$$S_Y(f) = S_{Y_1} + S_{Y_2}(f) + S_{Y_3}(f)$$

O que torna possível a utilização da técnica vista na parte teórica da experiência.

Podemos concluir então que para as próximas experiências antes de aplicarmos a técnica para medir a contribuição sonora de cada fonte vista devemos verificar se existe ou não correlação entre as diversas entradas pela função de coerência.

Com a figura abaixo podemos verificar que:



$$CR_{Y_1 Y_2}^2(f) = \frac{|S_{Y_1 Y_2}(f)|^2}{S_{Y_1}(f) S_{Y_2}(f)}$$

Como

$$S_{Y_1 Y_2}(f) = (h_1(f)) (h_2^*(f)) S_{X_1 X_2}(f)$$

$$S_{Y_1}(f) = |h_1(f)|^2 S_{X_1}(f)$$

$$S_{Y_2}(f) = |h_2(f)|^2 S_{X_2}(f)$$

temos que:

$$CR_{x_1 x_2}^2(f) = \frac{|s_{x_1 x_2}(f)|^2}{s_{x_1}(f) s_{x_2}(f)}$$

$$CR_{x_1 x_2}^2(f) = \frac{|h_1(f)|^2 |h_2(f)|^2 |s_{x_1 x_2}(f)|^2}{|h_1(f)|^2 s_{x_1}(f) |h_2(f)|^2 s_{x_2}(f)}$$

$$CR_{x_1 x_2}^2(f) = \frac{|h_1(f) h_2^*(f) s_{x_1 x_2}(f)|^2}{|h_1(f)|^2 s_{x_1}(f) |h_2(f)|^2 s_{x_2}(f)}$$

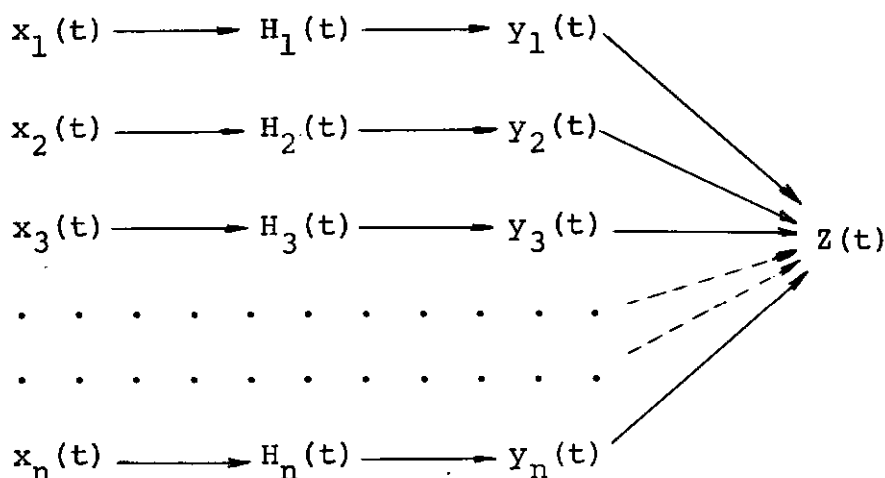
$$CR_{x_1 x_2}^2(f) = \frac{|s_{y_1 y_2}(f)|^2}{s_{y_1}(f) s_{y_2}(f)}$$

então

$$CR_{x_1 x_2}^2(f) = CR_{y_1 y_2}^2(f)$$

Podemos então ver que a função de coerência entre as entradas é igual a função de coerência entre as saídas.

Para o caso que temos n fontes emitindo sinais que por sua vez são captados num único ponto e sendo que estas fontes são correlatas entre si.



A contribuição sonora de cada fonte será dada pela seguinte equação:

$$S_i(f) = \sum_{j=1}^n S_{y_i y_j}(f)$$

As funções conhecidas são as entradas e a função somatório das saídas $Z(t)$.

Podemos formar uma matriz contendo as funções $S_{x_i x_j}(f)$ que será igual a:

$$S_{x_i x_j}(f) = \begin{vmatrix} S_{x_1 x_1}(f) & S_{x_1 x_2}(f) & \dots & S_{x_1 x_n}(f) \\ S_{x_2 x_1}(f) & S_{x_2 x_2}(f) & \dots & S_{x_2 x_n}(f) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{x_n x_1}(f) & S_{x_n x_2}(f) & \dots & S_{x_n x_n}(f) \end{vmatrix}$$

Podemos também formar uma matriz coluna contendo os elementos $S_{x_i z}(f)$, tendo finalmente a seguinte equação matricial

$$S_{x_i z}(f) = S_{x_i x_j} \cdot h_j(f)$$

onde $h_i(f)$ é uma matriz coluna.

Por intermédio da equação acima podemos calcular as funções de transferência de cada caminho por onde passam os si nais vindos das fontes até o ponto de recepção.

Podemos então calcular o vetor $h_i^*(f)$ que é o ve tor complexo conjugado transposto de $h_i(f)$.

Com estas matrizes podemos finalmente calcular a contribuição sonora de cada fonte pela seguinte equação:

$$S_i(f) = h_i^*(f) S_{x_i x_j}(f) h_j(f)$$

APÊNDICE 4

TRANSPARÊNCIA DA PAREDE

4.1.- A EXPERIÊNCIA

De acordo com a teoria exposta no item IV.8.1. fizemos esta experiência.

Na realidade, foram necessárias 2 experiências: a primeira sem a parede, e a segunda com a parede de que queremos a função de transparência.

Na primeira experiência, aproveitamos os dados obtidos na experiência citada no item V.2.2.. Na segunda experiência fizemos praticamente a mesma, apenas introduzimos a parede entre o altofalante e o microfone.

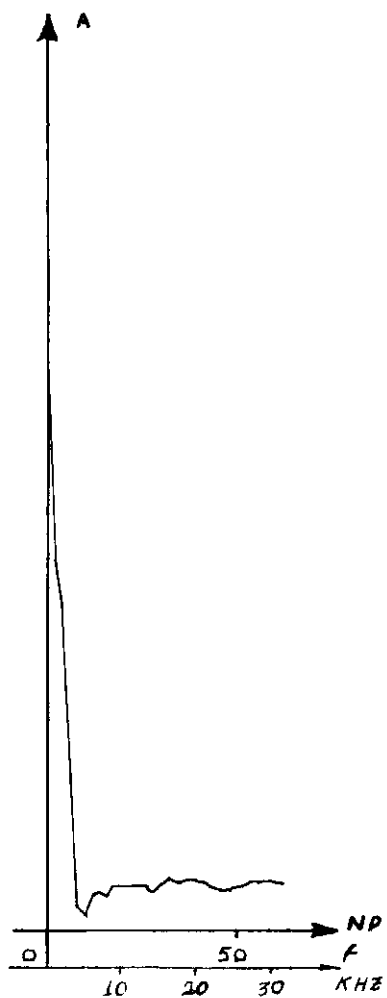
Com os sinais captados pelo microfone em ambas as experiências, e utilizando o programa TRANSP, como está descrito na item IV.8.2., os gráficos abaixo representam a função de transparência de parede que conseguimos obter.

Para vários comprimentos de sinal processado, obtivemos transparências diferentes. Isto é devido ao fato de que quanto for maior o número de pontos utilizados, maior será o efeito do eco que representa os caminhos indiretos de propagação.

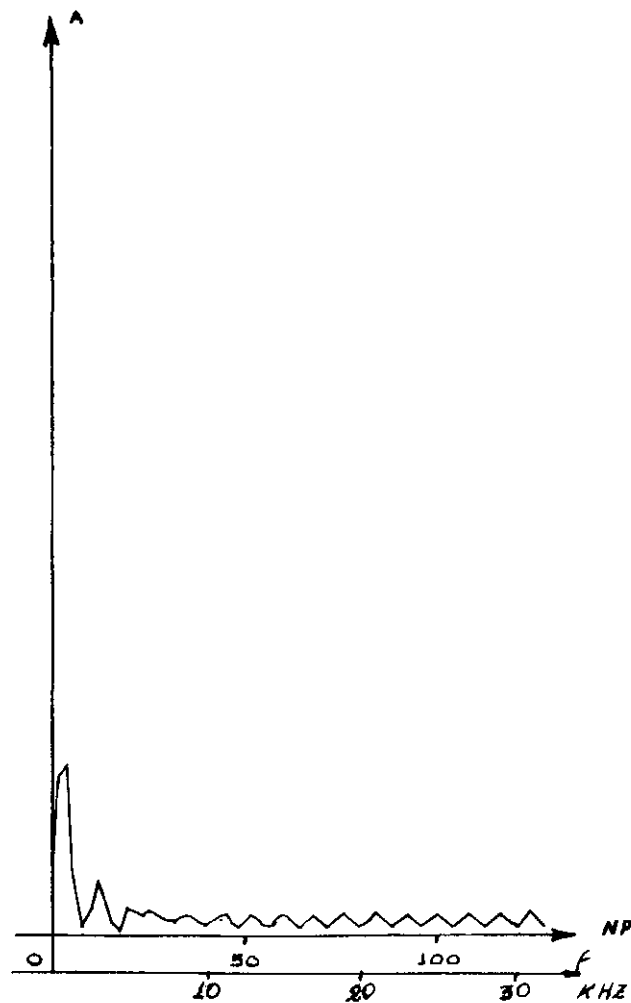
Este efeito, como foi visto no caso do Cepstrum, traduz-se como uma modulação da densidade espectral.

EXPERIÊNCIA DA TRANSPARENCIA DE PARÊDE

$N = 128$ $M = 7$ $N3 = 64$



$N = 256$ $M = 8$ $N3 = 128$

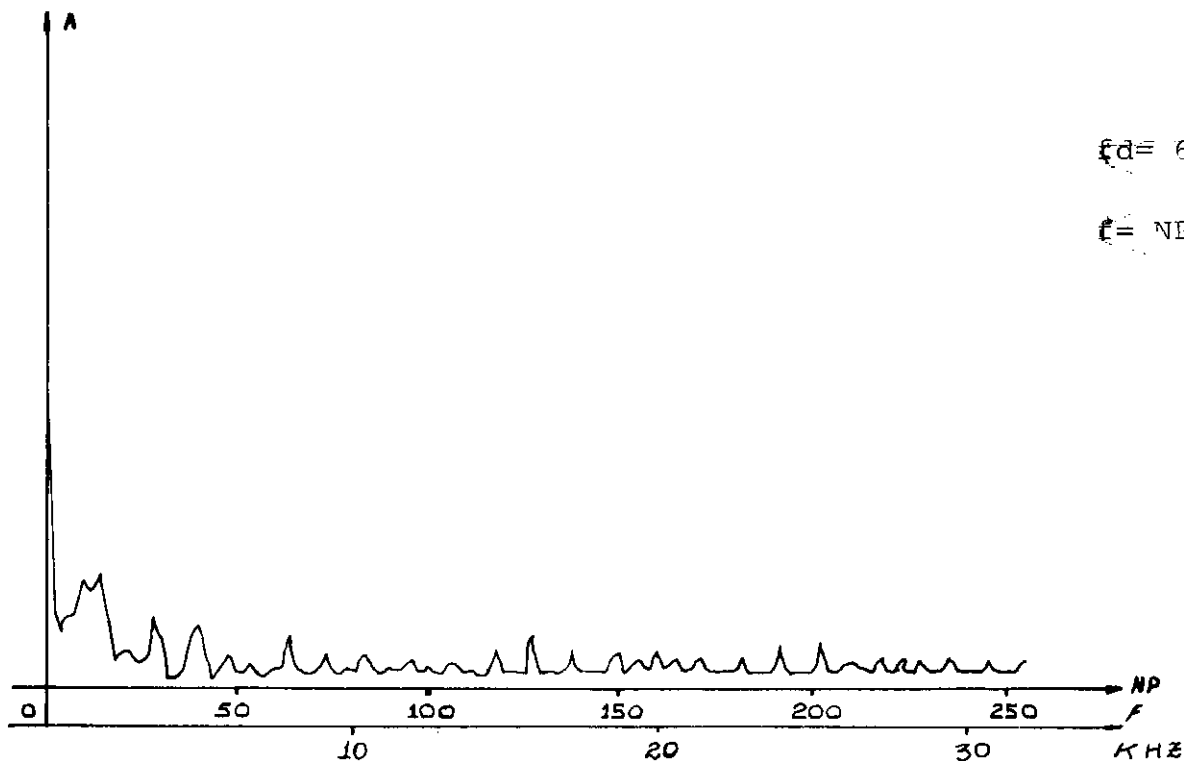


$$f_d = 64 \text{ KHz}$$

$$f = NP \cdot f_d / N$$

EXPERIÊNCIA DA TRANSPARÊNCIA DE PAREDE

$N = 512$ $M = 9$ $N3 = 256$



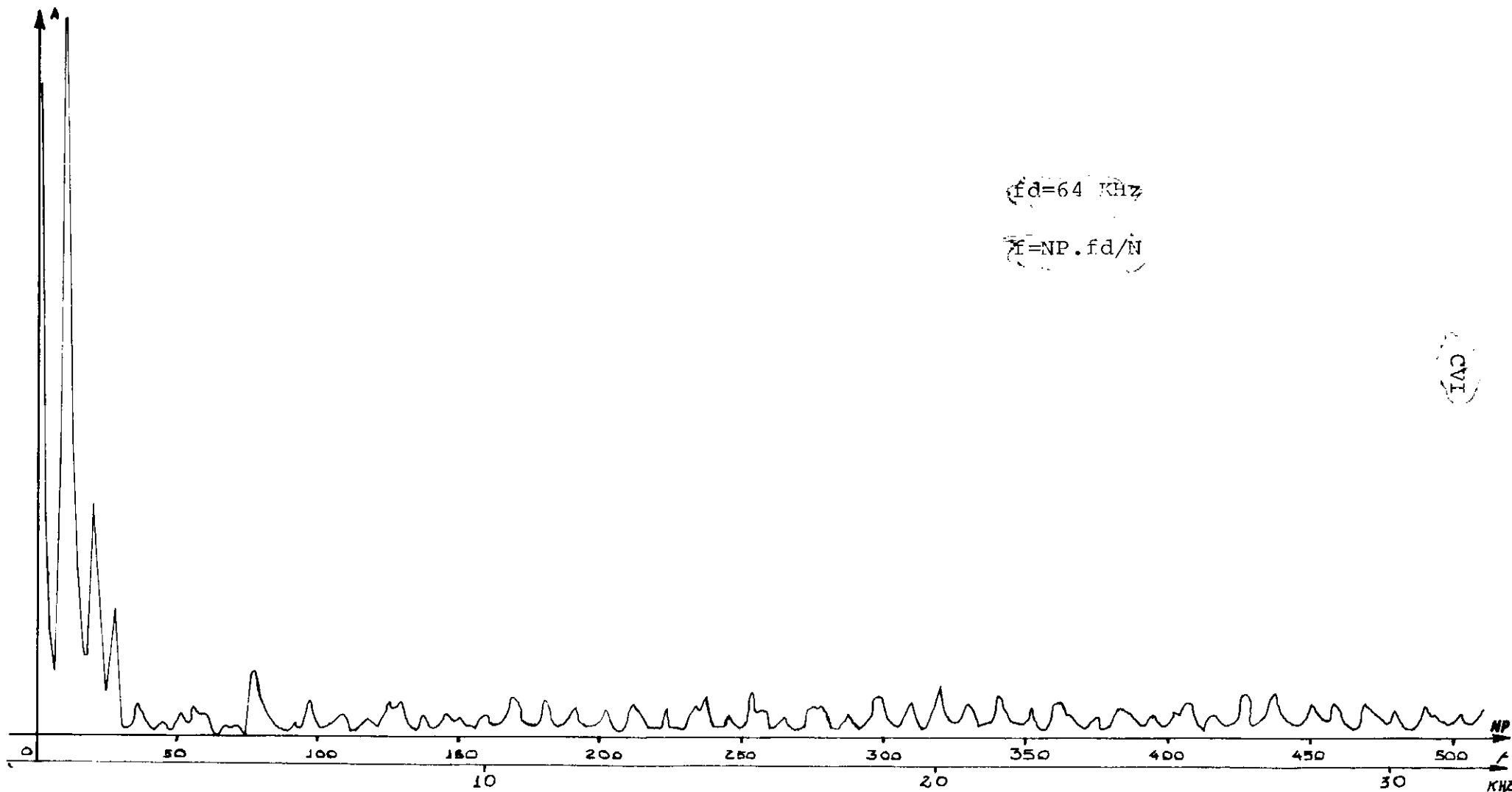
$$f_d = 64 \text{ KHz}$$

$$f = NP \cdot f_d / N$$

CV

EXPERIÊNCIA DA TRANSPARÊNCIA DE PAREDE

$N=1024$ $M=10$ $N3=512$



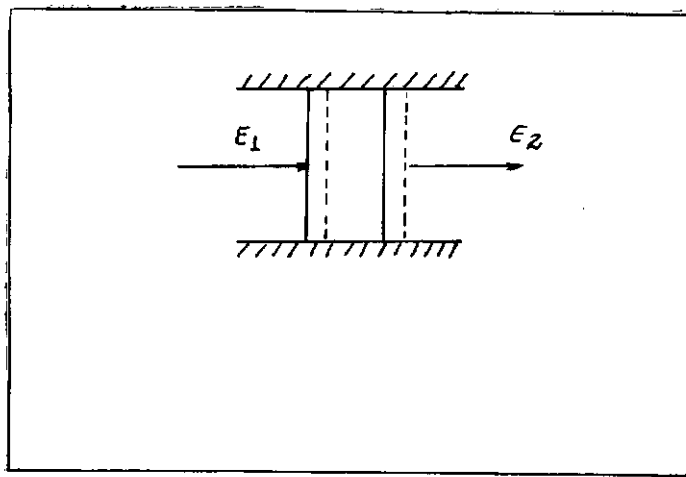
$f_d = 64 \text{ KHz}$

$f = NP \cdot f_d / N$

CVI

4.2.- COMENTÁRIOS SOBRE O EFEITO DE PAREDE

Pela teoria de Rayleigh podemos assimilar uma parede como um pistão vibrante de massa m , inelástico e sem amortecimento.



Definimos como coeficiente de transmissibilidade

τ como:

$$\tau = \frac{E_2}{E_1}$$

onde

E_1 energia que excita a parede

E_2 energia transmitida pela parede

Impedância acústica da parede

A impedância acústica é definida pela relação entre a pressão e a velocidade.

No caso que somente considera-se o efeito de mas sas, a impedância Δ é dada por

$$\Delta = \frac{P}{V} \quad \therefore \quad \Delta = j \omega M$$

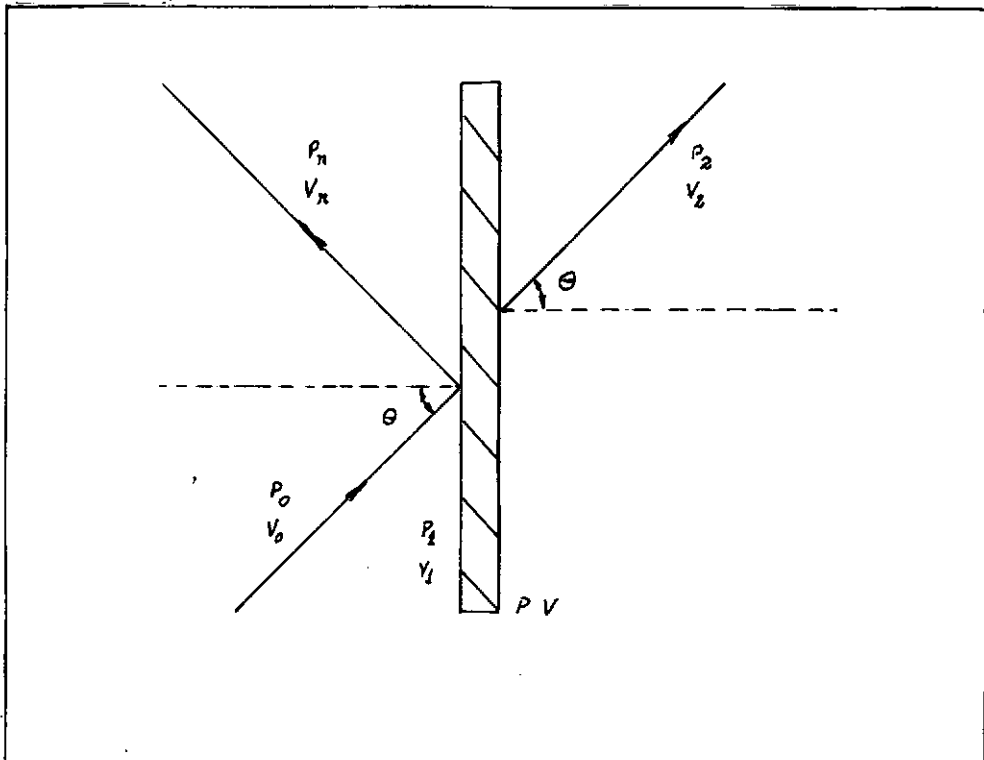
onde

$$j = \sqrt{-1}$$

ω frequência angular

M densidade superficial de massa (Kg/m^2)

Analizemos uma parede excitadora por uma força com velocidade v_0 e resultando uma pressão p_0 segundo a figura abaixo.



Para analisarmos esta figura sabemos que a pres
são atuante é dada por:

$$P_o = R V_o$$

onde R é a resistividade do ar.

Consideremos que a excitação ao incidir com a
parede faça um ângulo θ com a horizontal e que a excitação trans-
mitida forme o mesmo ângulo ao sair da parede.

Temos como incógnitas as seguintes variáveis

P_r	pressão refletida
V_r	velocidade da excitação refletida
P_1	pressão na parede
V_1	velocidade de excitação na parede
P_2	pressão transmitida
V_2	velocidade da excitação transmitida
P	pressão que atravessa a parede
V	velocidade de excitação que atravessa a parede

Podemos a partir das teorias de acústica formar
as seguintes equações:

a) por reflexão

$$V_1 = (V_o + V_r) \cos \theta$$

$$P_l = P_o + P_r$$

$$P_r = -R V_r$$

b) pela parede

$$V = V_r$$

$$P = P_l - P_r$$

$$\Delta = \frac{P}{V} = j \omega m$$

c) pela excitação transmitida

$$P_2 = R V_2$$

$$V_2 = V / \cos \theta$$

Resolvendo este sistema de 8 equações a 8 incógnitas temos:

$$V_r = -V_o \frac{\Delta \cos \theta / 2R}{1 + \Delta \cos \theta / 2R} \quad \therefore \quad P_r = P_o \frac{\Delta \cos \theta / 2R}{1 + \Delta \cos \theta / 2R}$$

$$V_l = V_o \frac{\cos \theta}{1 + \Delta \cos \theta / 2R} \quad \therefore \quad P_l = P_o \frac{1 + \Delta \cos \theta / 2R}{1 + \Delta \cos \theta / 2R}$$

$$V = V_l \quad \therefore \quad P = P_o \frac{\Delta \cos \theta / R}{1 + \Delta \cos \theta / 2R}$$

$$V_2 = V_o \frac{1}{1 + \Delta \cos \theta / 2R} \quad \therefore \quad P_2 = P_o \frac{1}{1 + \Delta \cos \theta / 2R}$$

$$\text{Sabemos que } \tau = \frac{|V_2|^2}{|V_o|^2}, \text{ então:}$$

$$\tau = \frac{|V_o|^2}{|V_o|^2} \cdot \frac{1}{\left|1 + \frac{\Delta \cos \theta}{2R}\right|^2}$$

$$\tau = \frac{1}{\left| 1 + \frac{\Delta \cos \theta}{2 R} \right|^2}$$

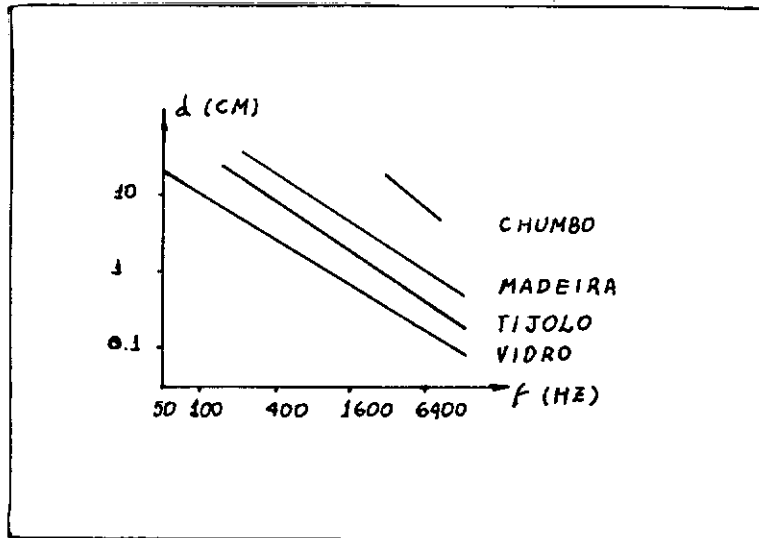
Na experiência realizada a excitação incidente θ era igual a zero, então:

$$\tau_0 = \frac{1}{\left| 1 + \frac{\Delta_0}{2R} \right|^2} \Rightarrow \tau_0 \approx \frac{A R^2}{\omega^2 m}$$

e a transmissibilidade é dada por

$$D_0 \approx 20 \log \frac{\omega m}{2 R} \quad (\text{dB})$$

Na figura abaixo temos a transmissibilidade de alguns materiais.



Podemos agora calcular a função de transferência da parede utilizada na experiência pela seguinte fórmula:

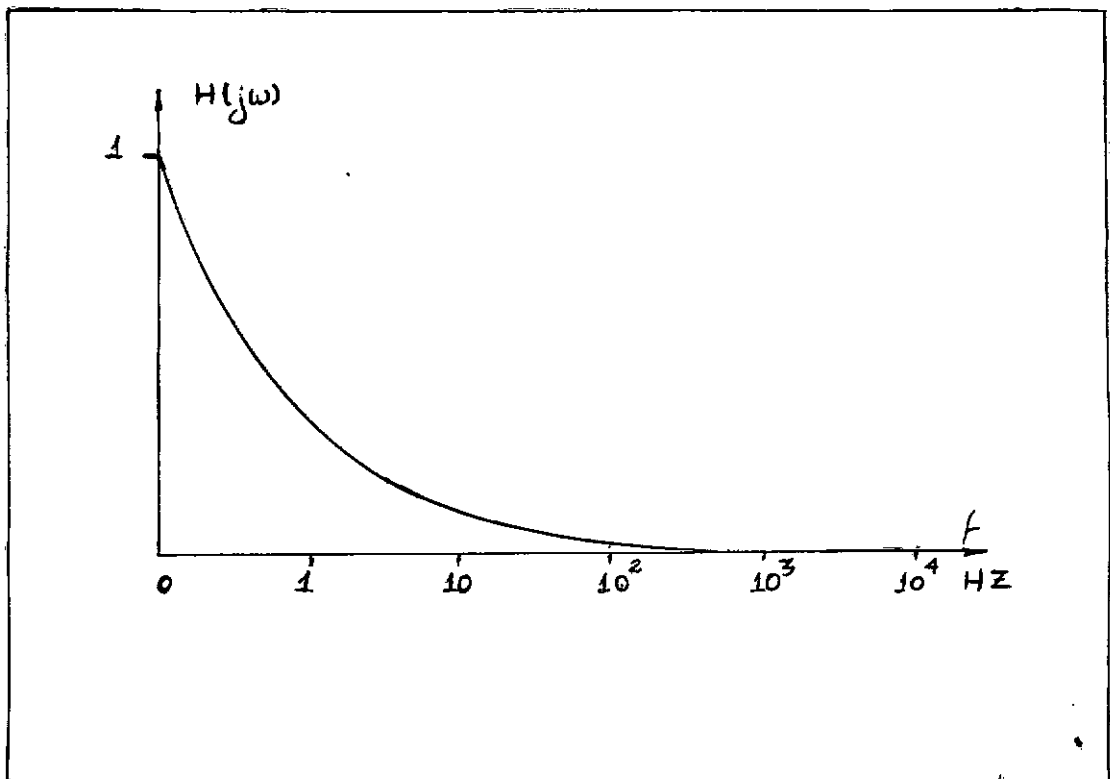
$$|H(j\omega)| = |P_2| / |P_0| \Rightarrow |H(j\omega)| = \frac{1}{1 + \frac{M^2 \omega^2}{2R}}$$

onde

$$M = 14.6 \text{ kg/m}^2$$

$$R = 400 \text{ Rayleigh}$$

Na figura abaixo temos então a função de transferência da parede.



LANÇAMENTO DE NAVIO

5.1. - INTRODUÇÃO À EXPERIÊNCIA

Ao se realizar o lançamento ao SD-14, batizado com o nome de SEMIRAMIS, pertencente à LIBRA S/A, pelo Estaleiro Mauã, mediu-se a aceleração e a velocidade deste casco durante o desenrolar deste evento.

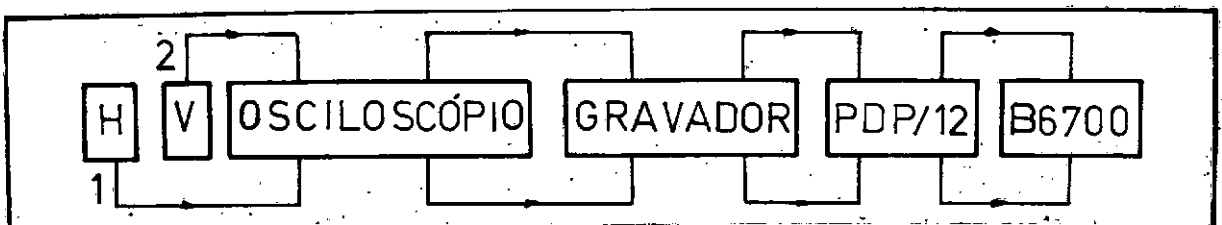
Esta experiência foi feita utilizando 2 acelerômetros: um do tipo strainage e outro do tipo piezoelétrico.

Os acelerômetros foram fixados a ré na altura da caverna (-2), isto é, esta caverna fica na parte posterior à linha do centro do eixo do leme, os acelerômetros estavam localizados na linha de centro do casco.

Para medir as acelerações verticais, foi usado o strainage e para as horizontais usou-se o piezoelétrico.

A diferença fundamental entre o strainage e o piezoelétrico reside no fato que o primeiro é sensível às rotações e o segundo não.

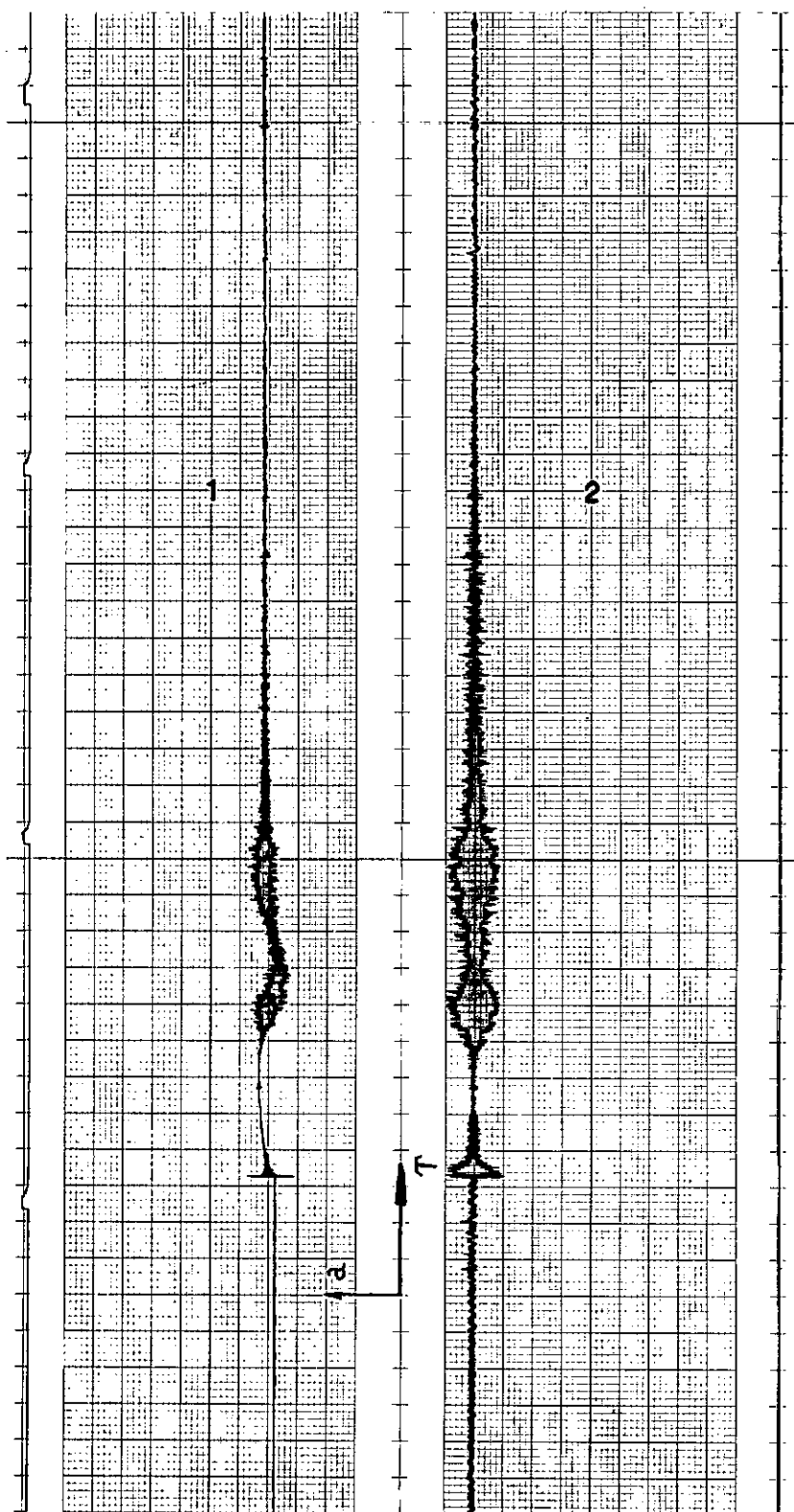
O esquema da experiência foi o seguinte:



ESQUEMA DA EXPERIÊNCIA DO NAVIO

Os gráficos dos sinais 1 e 2 podemos ver abaixo:

GRÁFICOS DOS SINAIS 1 E 2 DO NAVIO



T - TEMPO

5.2. - ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

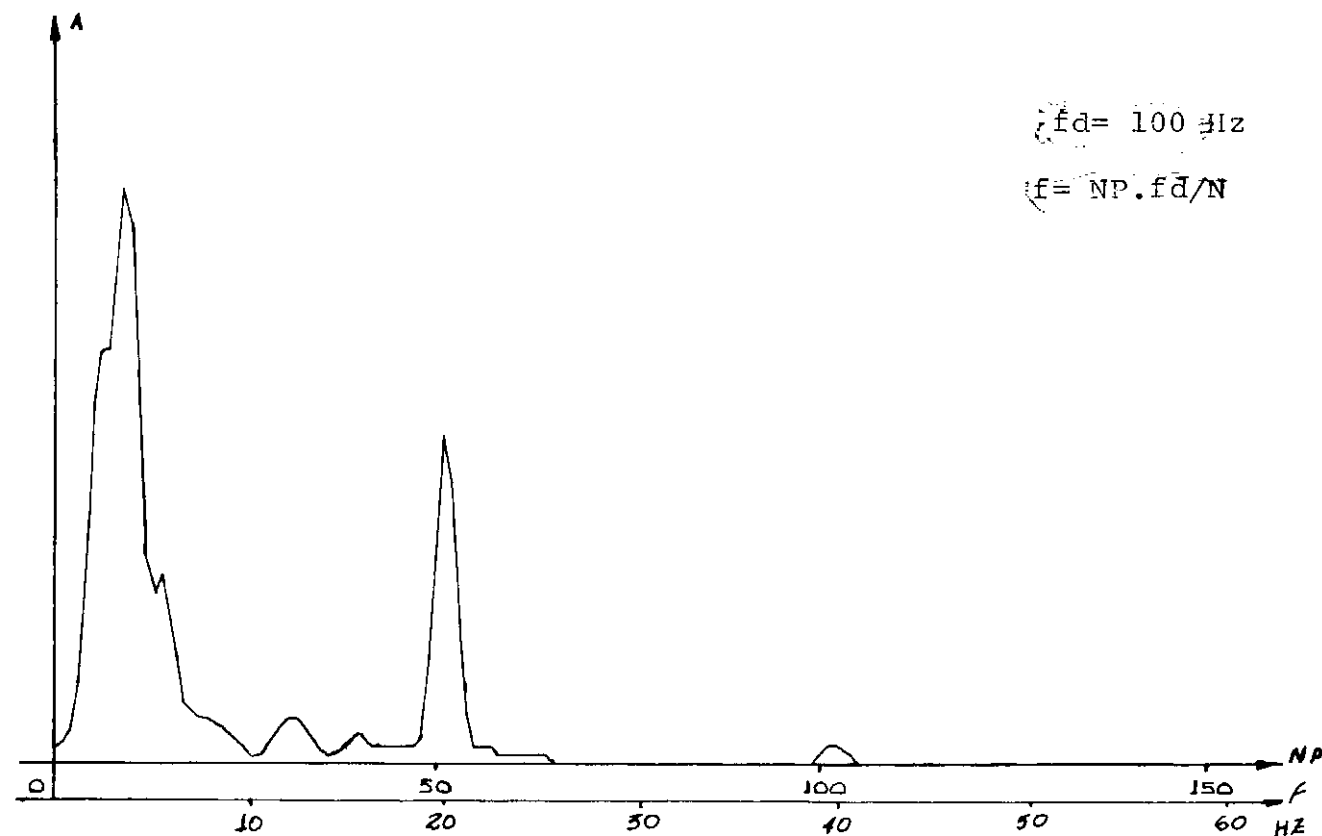
Cronologicamente esta foi a primeira experiência realizada. Os dados obtidos auxiliaram a elaboração dos programas deste trabalho. Nas figuras que seguem mostramos as funções de autoespectro tanto do sinal horizontal como sinal vertical. Como queríamos apenas uma análise rápida usamos 128 pontos, o que foi suficiente para detectarmos o grupo motor-gerador que nos forneceu energia elétrica para a alimentação dos equipamentos durante a experiência.

Esta experiência mostrou-nos que mesmo quando temos um sinal não estacionário podemos detectar componentes periódicos deste sinal.

EXPERIÊNCIA DO NAVIO_SINAL2_SALT

$N=256$ $M=8$ $N3=128$

A CONSTANTE QUE MULTIPLICA O SINAL DE ENTRADA É IGUAL AO
A CONSTANTE QUE MULTIPLICA O SINAL DE SAÍDA É IGUAL A 1



EXPERIÊNCIA DO NAVIO - SINAL 1 - SAUT

$N=256$ $M=8$ $N_3=128$

A CONSTATANTE QUE MULTIPLICA O SINAL DE ENTRADA É IQUAL A 1

A CONSTATANTE QUE MULTIPLICA O SINAL DE SAIDA É IQUAL A 0

$$f_d = 100 \text{ Hz}$$

$$f = NP \cdot f_d / N$$

CVIA

